



Laura Leinonen

PAINETTUIJEN VASTUSTEN OMINAISUUKSIEN MÄÄRITTELY

PAINETTUIJEN VASTUSTEN OMINAISUUKSIEN MÄÄRITTELY

Laura Leinonen
Opinnäytetyö
Syksy 2012
Tietotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma, elektroniikan suunnittelun ja testauksen suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Laura Leinonen
Opinnäytetyön nimi: Painettujen vastusten ominaisuuksien määrittely
Työn ohjaaja: Jussi Huikari
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2012
Sivumäärä: 77 + 2 liitettä

Tämän työn aiheena oli painettujen vastusten ominaisuuksien määrittely. Työ suoritettiin yhteistyössä Oulun seudun ammattikorkeakoulun ja VTT:n kanssa. Työn tarkoituksena oli perehtyä painettavaan älykkyyteen ja sen tekniikoihin, eri painotekniikoihin ja materiaaleihin sekä selvittää painettujen komponenttien ominaisuuksia erilaisten mittausten avulla. Työn tavoitteena oli tehdä mittausten perusteella tietolomake, jonka perusteella olisi tulevaisuudessa mahdollista tehdä vertailua eri tekniikoilla ja materiaaleilla painettujen komponenttien välillä.

Työn suoritus aloitettiin tutustumalla eri painotekniikoihin ja materiaaleihin sekä olemalla osallisina painokuvion suunnittelussa ja painotapahtumassa. Painoprosessin jälkeen komponenteille suoritettiin mittauksia niiden ominaisuuksien määrittämiseksi. Mittauksilla tutkittiin vastuksien resistanssiarvoja ennen ja jälkeen kalanteroinnin, tehohäviön suuruutta eri jännitteillä, lämpötilan muutosta käytössä sekä toimintaolosuhteiden vaikutusta komponentin ominaisuuksiin.

Mittausten perusteella saatiin selville painettujen vastuskomponenttien oleellimmat ominaisuudet. On kuitenkin otettava huomioon ongelmat tehonkeston mittauksessa, mistä johtuen komponenteista on mitattu tehohäviötä neljällä eri jännitteellä todellisen tehonkeston mittauksen sijaan. Kuitenkin kaikkia saatuja mittaustuloksia on mahdollista hyödyntää tulevaisuudessa suunniteltaessa komponenteille suoritettavia mittauksia ja vertailtaessa eri materiaaleilla ja tekniikoilla painettuja komponentteja toisiinsa.

Asiasanat:

Resistanssi, vastus, painomenetelmät, painomateriaalit, painettu älykkyys, testaus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Information Technology, Electronics design and testing

Author: Laura Leinonen
Title of thesis: Definition of printed resistor characteristics
Supervisor: Jussi Huikari
Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2012
Pages: 77 + 2 appendices

The theme of this thesis was to define the characteristics of printed resistors. This thesis was conducted in collaboration Oulu University of Applied Sciences and VTT. Purpose of this thesis was to familiarize ourselves with printed intelligence and it's techniques, the different techniques of printing, printing materials and resistors and to determine properties of printed components with various measurements. The aim of thesis was to make information sheet based on measurements. Meaning of this sheet is to make possible to compare different techniques and materials for printed components in the future.

Thesis began by learning about the different printing techniques and materials as well as being involved in the design of the printing layout and printing process. After the printing process the measurements were made to determine properties of printed resistors. Measurements were used to determine resistance values of resistors before and after calendaring, power dissipation with different levels of voltage, temperature change in use and impact of operating conditions.

These measurement results revealed the most essential features for printed resistors, taking into account the problems of the measurement of power duration. Because of that power dissipation was measured in four levels of voltage instead of just the actual power duration. However it is possible to take advantage of all results from measurements in the future when planning tests for components and when components printed with different techniques and materials are compared to each other.

Keywords:
Resistance, resistor, printing methods, printing materials, printed intelligence, testing

ALKULAUSE

Tämä työ tehtiin yhteistyössä Oulun seudun ammattikorkeakoulun ja VTT:n kanssa. Tahdon kiittää erikoistutkija ja tiiminvetäjä Mikko Paakkolanvaaraa VTT:ltä sekä erikoistutkija ja projektipäällikkö Harri Määttä Oulun seudun ammattikorkeakoulusta mahdollisuudesta tehdä tämä opinnäytetyö ja päästä tutustumaan painettavan älykkyyden maailmaan. Iso kiitos kuuluu myös lehtori Jussi Huikarille työn valvomisesta, lehtori Tuula Hopeavuorelle työn kielellisestä tarkistuksesta ja laboratorioinsinööri Markku Timoselle avusta mittalaitteiden ja tarvikkeiden kanssa.

Viimeisenä tahdon kiittää perhettäni ja miestäni tuesta ja kannustuksesta koko opinnäytetyö-projektin aikana.

Oulussa 30.8.2012



Laura Leinonen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
LYHENTEET JA MERKIT	8
1 JOHDANTO	10
2 PAINETTU ÄLYKKYYS	11
2.1 Painomenetelmät	11
2.1.1 Kohopaino	12
2.1.2 Fleksopaino	13
2.1.3 Syväpaino	15
2.1.4 Seripaino	17
2.1.5 Laakapaino	19
2.1.6 Kuumapuristus	22
2.1.7 Digitaaliset painomenetelmät	23
2.1.8 Mustesuihku	25
2.2 Painomateriaalit	26
2.2.1 Materiaalit	27
2.2.2 Painovärit	29
3 R-2-R-TEKNIikka	31
4 VASTUS	32
4.1 Perusperiaatteet ja ominaisuudet	32
4.2 Vastustyytit	33
4.2.1 Lineaariset vastukset	33
4.2.2 Epälineaariset vastukset	36
5 PAINETTU VASTUS	38
5.1 Materiaali- ja geometriavaihtoehdot	38
5.2 Toimintaa kuvaavat parametrit	39
5.2.1 Neliöresistanssi	40
5.2.2 Toleranssi	41
5.2.3 Tehonkesto	43

5.2.4 Vastinpiiri	43
5.2.5 Toimintaolosuhteiden vaikutus	44
6 TESTIKOMPONENTTIEN PAINOPROSESSI	46
6.1 Käytetty tekniikka	46
6.2 Käytetyt materiaalit	50
7 MITTAUKSET	51
7.1 Resistanssiarvojen mittaus ennen kalanterointia	51
7.2 Resistanssiarvojen mittaus kalanteroinnin jälkeen	55
7.3 Tehonkeston ja lämpötilan muutoksen mittaus	58
7.4 Olosuhteiden vaikutuksen mittaus	68
8 YHTEENVETO	74
LÄHTEET	76
LIITTEET	
Liite 1 Komponenttien painokuvio	
Liite 2 Vastuksen tietolomake	

LYHENTEET JA MERKIT

A	Alueen pinta-ala
CTS	Silkkipainotekniikkann painokaavion valmistus tulostamalla (engl. computer to screen)
DoD	Jatkuvan pisaroituksen menetelmä (engl. drop on demand)
HAST	Kiihdytetty lämpötila- ja kosteusrasitustesti(engl. highly accelerated temperature and humitidy stress test)
I	Piirissä kulkeva virta
L	Kappaleen pituus
LDR	Valovastus (engl. Light Dependent Resistor)
LPC	Nestikidepolymeeri (engl. Liquid Crystal Polymer)
NIP	Kosketukseton painotekniikka (engl. Non Impact Printing)
NTC	Lämpötilasta riippuvainen vastus (engl. Negative Temperature Coefficient)
OFET	Orgaanisista aineista valmistettu kanavatransistori (engl. Organic Field-Effect Transistor)
OLED	Orgaanisista aineista valmistettu hohtodiodi (engl. Organic Light Emitting Diode)
P	Komponentissa tai kytkennässä syntyvä teho
PC	Polykarbonaatti
PCT	Painekammiotesti (engl. pressure cooker test)
PEN	Polyeteeninaftalaatti
PET	Polyeteenitereftalaatti eli polyesteri
PI	Polyimidi
PTC	Lämpötilasta riippuvainen vastus (engl. Positive Temperature Coef ficient)
PTFE	Teflon
R	Komponentin resistanssi
R-2-R	Roll-to-roll eli rullalta rullalle -menetelmä
RFID	Radiotaajuinen etätunnistus (engl. Radio Frequency IDentification)
R _S	Komponentin neliöresistanssi

THB	Lämpötila- ja kosteusrasitustesti (engl. steady state temperature humidity bias life test)
t	Kappaleen paksuus
U	Piirissä vallitseva jännite
UV	Ultravioletti
VDR	Jänniteestä riippuvainen vastus (engl. Voltage Dependent Resistor)
W	Kappaleen leveys
ρ	Materiaalin resistiivisyys
Ω	Resistanssin yksikkö ohmi

1 JOHDANTO

Tämä työ tehtiin yhteistyössä Oulun seudun ammattikorkeakoulun ja VTT:n kanssa. Tämän työn tarkoituksena oli tutustua painettuun älykkyyteen ja sen eri menetelmiin sekä selvittää painettujen vastuskomponenttien ominaisuuksia perehtymällä niihin niin teoreettisesti kuin mittauksien avulla. Työ suoritettiin perehtymällä aluksi perinteisten vastuskomponenttien ominaisuuksiin sekä toimintaan, jonka jälkeen perehdyttiin painettujen vastusten ominaisuuksiin syventymällä painomenetelmiin, materiaaleihin ja geometria vaihtoehtoihin. Painoprosessin jälkeen selvitettiin painettujen vastusten ominaisuuksia tutkimalla ja mittaamalla niitä.

Painettuja vastuksia tutkittiin selvittämällä niiden resistanssiarvot ennen ja jälkeen kalanteroinnin. Mittauksen perusteella määriteltiin resistanssien minimi- ja maksimiarvot sekä toleranssit. Lisäksi vastuksista tutkittiin tehon kestoa, lämpötilan muuttumista käytössä sekä olosuhteiden vaikutusta komponenttien ominaisuuksiin. Mittaustulosten ja materiaalivalintojen perusteella laadittiin painetulle vastuskomponentille tietolomake, jonka perusteella voidaan jatkossa vertailla eri materiaaleilla ja tekniikoilla painettujen komponenttien ominaisuuksia toisiinsa.

2 PAINETTU ÄLYKKYYS

Painetulla älykkyydellä tarkoitetaan painomenetelmien, -tekniikoiden ja -materiaalien sekä tieteiden, kuten elektroniikan, lääketieteen, kemian, biokemian ja mekaniikan, tuntemuksen yhdistämistä uudella tavalla. Tämän yhteistyön tuloksena on mahdollista saada aikaan älykkäitä, toisin sanoen toiminnallisia rakenteita, joilla on esimerkiksi sähköisiä ominaisuuksia. Painetun älykkyyden menetelmien avulla on mahdollista saada aikaan esimerkiksi sähköisiä tai reaktiivisia ominaisuuksia sisältäviä koodeja, esimerkiksi viivakoodeja, RFID-tageja, visuaalisia efektejä, kuten hologrammeja, monikerrosrakenteita, elektroniikkaa, kuten passiivisia komponentteja, johtimia ja piirilevyjä, optiikkaa, kuten valopasteita ja mikrolinssejä, näyttöjä, kuten OLED- ja nestekidenäyttöjä, nanoputkia sekä erilaisia sensoreita ja ilmaisimia. Painetun älykkyyden mahdollisuudet ovat lähes rajattomat ja vain tulevaisuus näyttää, mitä kaikkea tekniikoilla on mahdollisuus saada aikaiseksi. (1.)

2.1 Painomenetelmät

Perinteinen painaminen perustuu painopinnalle muodostetun kuva-aiheen tai tekstin monistamiseen eli kopioimiseen. Painopintana käytetään yleensä paino-levyä tai -sylinteriä, jonka avulla haluttu kuvio saadaan siirrettyä halutulle materiaalille. Perinteisiä painomenetelmiä ovat kohopaino ja siitä kehitetty fleksopaino, syväpaino, laakapaino ja silkipaino. Nykyään käytetään koko ajan enemmän digitaalisia painomenetelmiä niiden yksinkertaisen muokattavuuden, helpon tuotannon aloituksen sekä edullisten aloituskustannusten vuoksi. (2.)

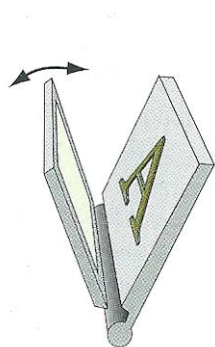
Eurooppalaisen painamisen isänä pidetään Johannes Gutenbergia, joka kehitti ensimmäisen kirjapainokoneen 1400-luvun puolivälissä. Lisäksi hän keksi käyttää irtonaisia kirjaimia yhtenäisen, puusta kaiverretun painolaatan sijaan ja valmistaa kirjaimet metallista valamalla. Tätä keksintöä pidetään painotekniikan suurena vallankumouksena. Siitä lähtien painotekniikat ovat jatkuvasti kehittyneet suurempien painomäärien ja suurempien nopeuksien vaatimaan suuntaan. Seuraavana syvennyttään yleisimpiin painotekniikoihin tarkemmin. (1; 2.)

Painettavan elektroniikan sovelluksien valmistukseen parhaiten soveltuvat flekso-paino-, syväpaino-, seripaino-, mustesuihku- ja kuumapuristustekniikat, vaikka tässä työssä on esitelty myös muiden yleisesti käytettävien painotekniikoiden periaatteet.

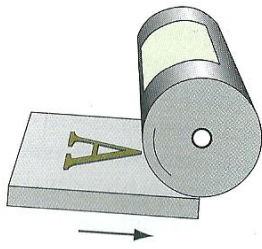
2.1.1 Kohopaino

Kohopainoa pidetään painomenetelmistä vanhimpana. Perinteisesti kohopainossa käytettävä painoaihe valmistettiin erityisestä kirjasinmetallista. Kirjasimet valmistettiin valamalla joko irtokirjakkeiksi tai riveittäin, jonka jälkeen painoelementit koottiin yhteen tasomaiseksi kehikoksi. Sylinterikoneissa kaareva painopinta saatiin aikaiseksi metallista valamalla. Nykyisin kohopainolevyt valmistetaan yleensä erilaisista fotopolymeerimuoveista valottamalla UV-valolla negatiivifilmin läpi, jolloin painavat pinnat kovettuvat ja pehmeäksi jääneet ei-painavat pinnat poistetaan. (2.)

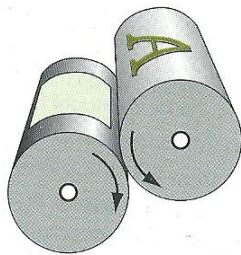
Kohopainokoneita on olemassa kolmea eri tyyppiä. Tasopainokoneessa eli tiikelissä sekä painopinta että painoalusta ovat molemmat tasomaisia (kuva 1). Taso-sylinterikoneissa painomateriaalia kuljettava painosylinteri puristuu tasossa olevaa painolaattaa vastaan (kuva 2). Sylinterikoneessa sekä painopinta että painoalusta ovat sylinterin mallisia (kuva 3). Kohopainon värinsiirto painopinnalta painomateriaaliin tapahtuu ns. nipissä eli painopintojen, esimerkiksi telojen välisessä puristuksessa. (2.)



KUVA 1. Tasokoneen periaate (2, s. 74)



KUVA 2. Taso-sylinterikoneen periaate (2, s. 74)



KUVA 3. Sylinterikoneen periaate (2, s. 74)

Vielä 1970-luvun loppuun saakka kohopaino oli johtava sanomalehtien painomenetelmä. Sitten offsetrotaatiopainokoneiden yleistyttyä on kohopainon käyttö jäänyt vähemmälle, mutta sitä käytetään edelleen tiettyjen erikoistuotteiden painomenetelmänä ja muunnelluilla arkkikohopainokoneilla tehdään erikoistoimintoja, kuten nuuttausta, stanssausta, perforointia, foliopainamista, preeglausta ja numerointia. (2.)

2.1.2 Fleksopaino

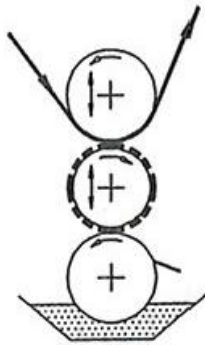
Fleksopaino on kehitetty sen esiasteesta ns. aniliinipainosta, jota käytettiin 1800-luvun lopulla yksinkertaisiin painotuotteisiin kuten pusseihin. Painopintana käytettiin tuolloin leimasimen tyyppistä kumilaattaa ja sprilliukoisia painovärejä. Painoprosessien ja -koneiden kehittyessä painojäljen laatu parantui ja sovellusalue kasvoi. 1950-luvulla painomenetelmää alettiin kutsumaan aniliinipainon sijaan fleksografiaksi tai fleksopainoksi. Fleksopaino on kohopainomenetelmä, jossa käytetään metallisten painopintojen sijaan joustavia painosylintereitä tai -laattoja. Fleksopaino on hyvin yleinen pakkausteollisuudessa ja koneet ovat useimmiten rotaatiopainokoneita. (2.)

Fleksopainannassa painoaihe on kohokuviona eli reliefinä joustavasta materiaalista valmistetulla painolevyllä tai -sylinterillä. Käytettävä painoväri on matalaviskoottista sekä juoksevaa ja se annostellaan painopinnalle rasteri- eli anilox-telalta, jossa on nk. rasterikuppeja kuljettamassa painoväri mustekaukalosta painopinnalle. Väri siirtyy anilox-telalta painopinnan koholla oleville pinnoille ja niiltä painonipissä painomateriaalille. Suurin ero fleksopainossa kohopainoon verrattuna on juokseva painoväri ja tästä johtuva yksinkertainen värilaite sekä joustava painopinta. Joustava painolaatta mahdollistaa painamisen vaativammille materiaaleille, kuten karkeille pinnoille, mutta se myös rajoittaa yksityiskohtia. Painonipissä olevan puristuksen hallinta on erityisen tärkeää fleksopainossa, sillä liian suuri paine aiheuttaa painotelan muodonmuutoksia ja liian pieni paine aiheuttaa epätäydellisiä kuvioita ja huonoa värinsiirtoa. (1; 2.)

Fleksopainon painopinta voi muodostua yhdestä isosta painolevystä tai useammasta erillisestä, painosylinterin pinnalle kiinnitetystä laatasta. Painopintoina yleensä käytetään kumista tai fotopolymeeristä tehtyjä levyjä tai sylintereitä. Ennen fotopolymeerien yleistymistä materiaaleina käytettiin usein kumista vulkanoimalla valmistettuja painolaattoja. Tällä tekniikalla tehdyt painolaatat olivat haastavia, sillä vulkanoinnin aiheuttama kutistuma ja kaarevalle pinnalle asetettuna venymä aiheutti kohdistusongelmia. Uusin menetelmä painopintojen valmistamiseen on kumipäällysteisten sylintereiden suorakaiverrus laserilla. Tällä tekniikalla on mahdollista saada aikaan saumaton ja kestävä painopinta. Tässä tekniikassa myös yksityiskohtien toisto on hyvä. (2.)

Fleksopainossa painolaite eli yksikkö, jossa on värilaite, painotela ja painonippi on hyvin yksinkertainen ja nopeasti kuntoon laitettava. Tyypillisesti värilaite koostuu värialtaasta ja siinä pyörivästä kumiseoksella päällystetystä teräksestä valmistetusta nosto- eli allastelasta sekä anilox- eli rasteritelasta, jonka tarkoituksena on siirtää väri painotelalle. Tässä tekniikassa siirtyvän värin määrää säädellään nostotelan ja anilox-telan välisessä nippipuristuksessa, mutta tämän rakenteen haittana on epätasainen värin syöttö painettaessa suuremmilla nopeuksilla. Siirtyvän värimäärän tasaisuutta voidaan parantaa käyttämällä ns. raakeliterää, joka pyyhkii ylimääräisen värin pois anilox-telalta. On myös ole-

massa järjestelmiä, joissa anilox-tela on suoraan värialtaassa, kuten kuvassa 4.
(2.)



KUVA 4. Fleksopainotekniikan periaate (3)

Kuvasta 4 on nähtävissä fleksopainotekniikan periaate. Anilox-tela nostaa väriä värialtaasta rasterikuppiensa avulla ja raakeliterä poistaa ylimääräisen värin telan pinnalta, jonka jälkeen väri siirtyy painopinnalle ja siitä edelleen painomateriaalille painonipissä. Tätä tekniikkaa olisi mahdollisesti voitu käyttää tähän työhön liittyvien rakenteiden painamisessa, mutta tarkkuus ei olisi välttämättä ollut riittävä pienimmille rakenteille.

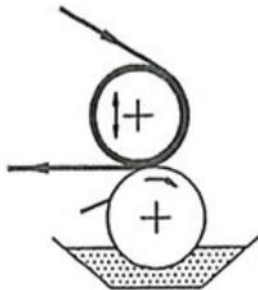
2.1.3 Syväpaino

Syväpainomenetelmä eli gravure on päinvastainen kohopaino- ja fleksopainomenetelmiin verrattuna, sillä siinä painava pinta on ei-painavaa pintaa alempana painolaatassa tai -sylinterissä. Painokuvio saadaan aikaan kuparilla pinnoitetulle metallisylinterille joko syövyttämällä tai kaivertamalla timanttiterällä tai laserilla, jonka jälkeen ne yleensä päällystetään vielä kromilla painoskestävyyden parantamiseksi. Näiden tekniikoiden tarkoituksena on saada aikaan sylinterin pintaan rasterikuppirakenne värin siirtoa varten. Syväpainotekniikassa kuvioidun painosylinterin pinta kastellaan juoksevalla painovärillä ja ylimääräinen väri pyyhitään pois raakeliterällä, jolloin väriä jää vain painosylinterin rasterikuppeihin. Tämän jälkeen väri siirtyy painonipin puristuksessa painomateriaalille. Puristustela on yleensä materiaaliltaan kumia. (1; 2.)

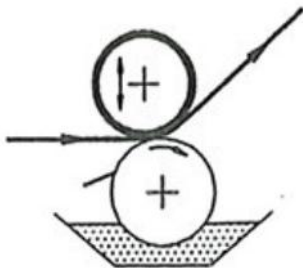
Syväpainotekniikassa painoyksikkö koostuu värialtaasta, painosylinteristä, raakeliterästä, puristustelasta ja kuivaimesta. Syväpainotekniikassa käytettävä väri-

laite on erittäin yksinkertainen juoksevan ja matalaviskoottisen painovärin takia. Syväpaino soveltuu parhaiten suuriin painosmääriin sen suurten aloituskustannusten vuoksi. Vaikka tekniikka on yksinkertainen, aloituskustannukset nousevat painosylinterien valmistuskustannusten vuoksi. Syväpainotekniikkaa olisi ollut mahdollista käyttää tähän työhön liittyvien rakenteiden painamiseen, mutta se ei olisi ollut kannattavaa pienten painomäärien ja käyttötarkoituksen vuoksi. (2.)

Syväpaino eli Gravure-tekniikassa on olemassa kaksi eri menetelmää, Forward gravure ja Reverse gravure, joista ensimmäisessä painomateriaali kulkee samaan suuntaan kuin painotela painonipissä ja jälkimmäisessä eri suuntaan. Reverse gravure -tekniikka soveltuu ainoastaan jatkuviin kuvioihin, kuten raitoihin. Kuvissa 5 ja 6 on esitetty edellä mainittujen syväpainon sovellusmuotojen toimintaperiaatteet. (3.)



KUVA 5. Reverse gravure -tekniikan periaate (3)



KUVA 6. Forward gravure -tekniikan periaate (3)

Kuvista 5 ja 6 on nähtävissä, että painosylinteri pyörii suoraan värialtaassa, jonka jälkeen ylimääräinen väri kaavitaan pois metallisella raakeliterällä ja väri siirretään painonipissä painomateriaalille.

Syväpainotekniikalla on mahdollista painaa vain sileitä materiaaleja, mutta sillä voidaan painaa sekä paperia että muovia, mikä on painettavan älykkyyden kannalta oleellista, koska muovi on käytetyin pohjamateriaali painettavaan älykkyyteen liittyvissä sovelluksissa. Syväpainotekniikan värintoisto on hyvä ja tekniikkana se on edullinen, mikäli painosmäärät ovat suuria. Värinsiirto on yksinkertaista ja prosessi on helposti hallittavissa. Tekniikan huonoina puolina voidaan pitää suuria aloituskustannuksia ja painovärien liuottimien vaatimaa talteenottoa. (2.)

2.1.4 Seripaino

Seripaino eli rotary screen -tekniikassa painoaiheen sisältävä painokaavio eli sapluuna kiinnitetään painoväriä läpäisevään seulakankaaseen, jolloin saadaan aikaiseksi painopinta, jonka väri läpäisee vain halutuista kohdista. Väri saadaan siirrettyä painopinnan läpi painomateriaalille puristamalla kumisella raakelilla. Painokaavio on mahdollista valmistaa joko leikkaamalla tai valottamalla. Leikkausmenetelmää voidaan käyttää vain yksinkertaisimmissa sovelluksissa, joten yleensä käytetään valotusmenetelmää. (1; 2.)

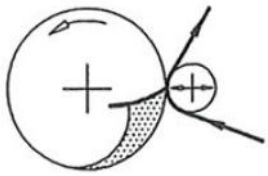
Valotusmenetelmiä ovat suora, epäsuora ja tulostus (CTS). Sekä suorassa että epäsuorassa tekniikassa käytetään originaalina positiivifilmiä. Painoaihe on myös mahdollista projisoida valoherkälle kalvolle. Käytettäessä suoraa menetelmää seulakangas päällystetään valoherkällä kalvolla ja kalvon kuivuttua painoaihe valotetaan positiivifilmin läpi UV-valolla. Valottuneet kohdat kovettuvat ja valottumattomat kohdat pestään pois kehitysvaiheessa. Käytettäessä epäsuoraa menetelmää valoherkkäkalvo on nk. kantokalvon päällä ja se valotetaan ja kehitetään kun suorassakin menetelmässä, mutta lopuksi valmis kaavio siirretään seulakankaan alapinnalle ja kantokalvo poistetaan. Käytettäessä tulostusmenetelmää painoaihe tulostetaan kalvotetun seulakankaan päälle mustesuihkutekniikalla ja tämän jälkeen se valotetaan UV-valolla, jolloin tuloste toimii

maskina positiivifilmin tavoin. Kehitysvaiheessa sekä muste että kalvon valotumattomat osat poistetaan. (2.)

Seulakankaan on oltava materiaaliltaan kestävä, tukevaa, tasaista ja venymätöntä, mutta joustavaa, sillä hyvän painojäljen aikaansaamiseksi on oleellista, että seulakangas antaa hieman periksi. Lisäksi sen on kestävä mekaanista rasitusta painon aikana ja sallittava painoväriin läpäisy. Yleensä seulakankaat ovat synteettisiä materiaaleja, kuten polyamidia tai polyesteriä, mutta myös silkkiä käytetään. Joissakin sovelluksissa vaaditaan materiaalilta antistaattisuutta, ja tällöin käytetään esimerkiksi karbonoitua polyamidia tai metalloitua polyesteriä. Mikäli tarvitaan suurta lämmön kestävyyttä ja erittäin hyvää mittapysyvyyttä, valmistetaan seulakangas teräslangasta. (2.)

Tasopainokoneessa seulakangas kiinnitetään yleensä teräksestä, alumiinista tai puusta valmistettuun kehykseen sopivalle kireydelle. Painokehyksen tehtävänä on toimia painovärikaukalona painovaiheessa sekä pitää seulakangas paikoillaan. Kehysmateriaalin valinnassa tärkeitä ominaisuuksia ovat jäykkyys, paino sekä painoväriin ja puhdistusaineiden sieto. Seulakangas voidaan kiinnittää kehykseen mekaanisesti kiinnikkeiden avulla tai liimaamalla. Sylinteri- eli rotaatiopainokoneissa seulakangas kiinnitetään kehyksen sijaan suoraan painosylinterin ulkopinnalle. (2.)

Seripainotekniikassa värin siirto painomateriaalille tapahtuu, kun värikerrosta seulakankaan päällä (sylinteripainokoneessa telan sisällä) työntävä raakeli puristaa painoväriin seulakankaan lävitse. Painotulokseen vaikuttavia tekijöitä ovat seulakankaan tiheys, paksuus ja painoväriin läpäisy, väriemulsion paksuus eli juoksevuus, painonopeus sekä raakelin tyyppi ja kulma. Käytössä olevia seripainokoneita on useaa eri tyyppiä. Koneita on olemassa niin yksinkertaisia pöytämallisia koneita kuin automaattisia taso- ja sylinteripainokoneita. Tähän työhön liittyvät komponentit painettiin seripainotekniikalla rotaatiopainokoneella. Tässä tekniikassa kuvioitu seulakangas oli pingotettu sylinterin muotoon ja musteen syöttö tapahtui sylinterin sisälle, josta raakeliterä puristi painoväriin seulan lävitse painomateriaalille kuvan 7 mukaisesti. (2.)



KUVA 7. Silkkipainotekniikan periaate (3)

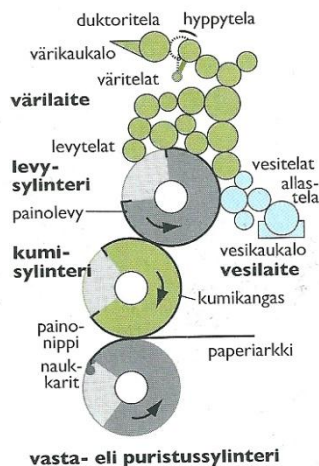
2.1.5 Laakapaino

Laakapaino eli offset on maailman yleisin painomenetelmä perinteisten painotuotteiden, kuten sanomalehtien painatuksessa. Offset-tekniikkaa on mahdollista käyttää myös painettavan älykkyyden sovellusten valmistukseen, mutta tätä tekniikkaa ei olisi voitu käyttää tähän työhön liittyvien komponenttien painamiseen, sillä työn tilaajalla ei ole laakapainoyksikköä. Offsetin peruspainomenetelmää kutsutaan yleisesti laakapainoksi. Laakapainossa painava ja ei-painava pinta ovat samassa tasossa, mutta pintojen pintakemialliset ominaisuudet ovat erilaisia. Offset-painokoneita on olemassa kahta päätyyppiä, arkkioffset-koneita ja offset-rotatiokoneita. Nimensä mukaisesti arkkikoneet painavat arkeille ja rotaatiokoneet käyttävät painomateriaalinaan rullalla olevaa materiaalia. Tämän lisäksi rotaatiokoneet jaetaan vielä kahteen tyyppiin, heatset-offsetkoneisiin ja coldset-offset-koneisiin. Näiden tyyppien erona on se että heatset-koneet on varustettu kuivaimella ja coldset-koneita ei. (1; 2.)

Offset-tekniikka perustuu siihen, että vedellä ja öljyllä on erilaiset pintajännitykset ja näin ollen ne eivät sekoitu keskenään, vaan hylkivät toisiaan. Tämän lisäksi kiinteillä pinnoilla on myös vastaavasti erilaiset pintaenergiat. Näin ollen neste leviää ja tarttuu kiinteälle pinnalle, mikäli sen pintajännitys on alhaisempi kuin kiinteän aineen pintaenergia. Offset-tekniikassa painoprosessi aloitetaan kastamalla painolevy kostutusvedellä, joka leviää levyn ei-painaville pinnoille, koska niiden pintaenergia on korkeampi kuin veden pintajännite. Tämän jälkeen painolevylle levitetään öljypohjainen painoväri. Painoväri tarttuu vain painolevyn painaville pinnoille, jonka jälkeen painoväri siirtyy painolevyltä kumipinnalle ja siitä edelleen painomateriaalille. Värin siirtyminen tällä mekanismilla johtuu siitä, että kumipinnan ja paperin pintaenergiat ovat korkeampia kuin painovärin pintajännitys. Painavaa pintaa sanotaan oleofiiliseksi eli öljyä vastaanottavaksi ja

samalla myös hydrofobiseksi eli vettä hylkiväksi. Vastaavasti ei-painavaa pintaa kutsutaan hydrofiiliseksi eli vettä vastaanottavaksi. (2)

Nykyaikainen offsetpainoyksikkö koostuu vesi- ja värilaitteesta sekä levy-, kumi- ja vasta- eli puristussylinteristä. Vesi- ja värilaitteet koostuvat vesi-/värialtaasta ja vesi-/väritelosta. Painoväri on offset-tekniikassa korkeaviskootista eli jähmeää ja siksi sen työstämiseen tarvitaan muihin tekniikoihin verrattuna suuri telasto. Painovärin jähmeyden vuoksi väriteloa on värilaitteessa usein jopa yli kymmenen ja niillä on eri halkaisijat. Niitä teloja, jotka koskettavat painolevyä, kutsutaan levyteloiksi ja sivusuunnassa liikkuvia teloja kutsutaan hierrinteloiksi. Näiden edellä mainittujen telatyyppeiden lisäksi väritelastoon kuuluu askeleittain pyörivä duktoritela. Duktoritela sijaitsee värialtaassa ja usein värinsiirto duktoritelasta väritelastoon tapahtuu ns. hyppytelan avulla. Väritelaston tehtäviin kuuluvat värin siirto painolevylle, värin varastointi, värikerroksen tasoittaminen jokaisen sylinterikierroksen jälkeen ja värin notkistaminen sopivaan muotoon. On myös mahdollista, että osa teloista on jäähdytettyjä värin lämpötilan vakioimiseksi. Offset painokoneen painoyksikön periaatteellinen rakenne näkyy kuvasta 8. (2.)



KUVA 8. Offset-painoyksikön periaatteellinen rakenne (2, s. 48)

Värin siirto pintojen välillä tapahtuu kahden telan välisessä nipissä, kuten muissakin aikaisemmin esitellyissä menetelmissä. Offset-tekniikassa väri siirtyy telalta toiselle nk. telanipissä ja telalta painomateriaalille painonipissä. Koska painoväri on tahmeaa, pyrkii painomateriaali helposti seuraamaan kumisynteriä. Mikäli painomateriaalin pintalujuus on liian alhainen voi kuituja tai pintamateriaalia

irrota värin mukana. Tämän takia on värinsiirrossa otettava huomioon sylinterien ja telojen pintamateriaalien ominaisuudet, värin sekä paperin ominaisuudet, nipin puristusaine ja ajonopeus. Edellä mainittujen lisäksi on otettava huomioon myös väri-vesitasapaino eli painotapahtuman aikana painoväriin sekoittuvan kostutusveden ja painovärin tasapaino. (2.)

On olemassa myös sellainen offset-tekniikka, jossa ei käytetä lainkaan kostutusvettä vaan se on korvattu silikonipinnoilla painolevyn ei-painavilla pinnoilla. Tätä tekniikkaa kutsutaan kuivaoffset-menetelmäksi. Hyvänä puolena kuivaoffsetissa on se, että säästytään kostutusveden aiheuttamilta ongelmilta. Väri-vesitasapainon säätelystä johtuvia ongelmia ovat ainakin vesimarkkeeraus sekä painojäljen sävyttyminen. Vesimarkkeerauksessa painojäljessä on nähtävissä vaaleampia alueita ja painojäljen sävyttymisessä painoväriä tarttuu myös ei-painaville pinnoille. Tämän lisäksi pisteenkasvu on pienempää, aloitusmakulatuuri on vähäisempää ja vedestä johtuvia laatu ongelmia ei esiinny. Myös ympäristövaikutukset ovat pienempiä ja kustannukset halvempia. Haittapuolina menetelmässä on kalliimmat painolevyt ja -värit sekä prosessin herkkyyks lämpötilan muutoksille. (2.)

Offsetpainopinnat ovat yleensä rungoltaan alumiinia, mutta myös polyesteriä käytetään. Painopinta pinnoitetaan valoherkillä materiaaleilla, kuten hopeahalideilla, diatsoyhdisteillä tai fotopolymeereillä, ja valotetaan. Valottamisen lisäksi painopintoja on mahdollista valmistaa tulostamalla lasertulostimella.

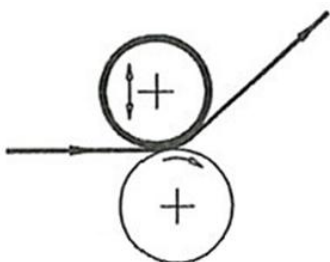
Offset-menetelmällä on mahdollista painaa lähes kaikille paperi- ja kartonkilaajille. Muovipinnoille painaminen on mahdollista, mikäli materiaali on tarpeeksi ryhdikästä ja paksua. Myös metallia ja metalloitua paperia voidaan käyttää painomateriaalina. Offset-menetelmän hyviä puolia ovat huonojenkin materiaalien sävyjen ja yksityiskohtien toisto, mahdollisuus eri rasteritiheyksiin ja -rakenteisiin, painopintojen valmistuksen useat eri mahdollisuudet ja valmistuksen edullisuus, useat painokonetyypit ja mahdollisuus erilaisiin tuotteisiin ja tuotemääriin. Huonoja puolia ovat painovärien suppea valikoima, sillä niiden on oltava öljypohjaisia, painovärin tahmeus, joka vaatii materiaalilta suurta pintalujuutta ja arkin pituus, joka on rajoitettu. (2.)

2.1.6 Kuumapuristus

Kuumapuristus eli hot embossing -tekniikan periaatteena on ”pakottaa” kuumuudessa ja paineessa painomateriaalille kuumapuristusaihiolla ts. shimillä oleva kuvio. Tällä tekniikalla on mahdollista saada aikaiseksi, niin koristeellisia kuin toiminnallisia rakenteita painomateriaalin pintaan eri tasoissa olevilla rakenteellisilla muutoksilla. Kuumapuristustekniikassa painomateriaalille syntyvät kuviot ovat alkuperäistä alempana painopinnassa olevien kohokuvioiden takia. Pakkausteollisuudessa yleisesti käytetyssä tekniikassa luodaan valoa heijastavia koristeellisia kuvioita muoviin, jolla on mahdollista päällystää erilaisia pakkauksia, paperia tms. Vain mielikuvitus on rajana, mihin näitä rakenteita voidaan käyttää.

Hot embossing -tekniikalla on myös mahdollista saada aikaan esimerkiksi valoa ja nesteitä johtavia nanoputkia tai kanavia. Tällä menetelmällä saadaan aikaan toiminnallisia rakenteita, joissa hyödynnetään esimerkiksi kapillaari-ilmiötä.

Kuvassa 9 esitetään periaate hot embossing -tekniikalle. Kuvan mukaisesti materiaalia kuljetetaan painonipin lävitse, jossa paineen ja kuumuuden vaikutuksesta painomateriaalille muodostuu painopinnan kohokuvion mukainen rakennemuutos aikaisempaa pintaa alemmas. Lämpö kuumapuristus-prosessiin saadaan lämmittämällä sekä kuumapuristustelaa että vastatelaa joko kuumaa öljyä kierrättämällä tai sähkölämmityksellä. Hot embossing -tekniikkaa käytetään myös painettavaan älykkyyteen liittyvissä painotöissä. (3.)



KUVA 9. Hot embossing -tekniikan periaate (3)

2.1.7 Digitaaliset painomenetelmät

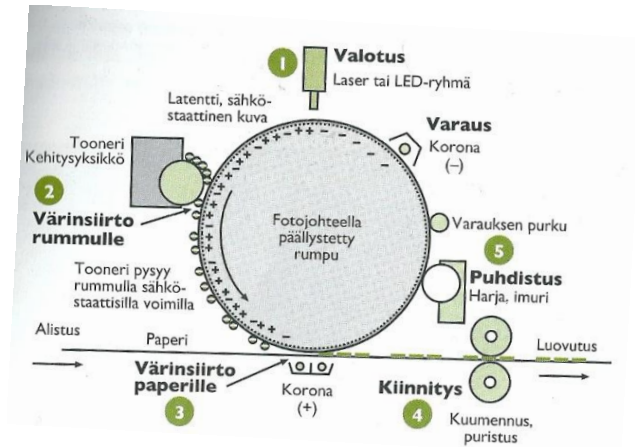
Digitaaliset painomenetelmät ovat kehittyneet paljon viime vuosien aikana ja näissä tekniikoissa digitaalisessa muodossa oleva informaatio tulostetaan nopeasti ja joustavasti ilman erillisten painolevyjen valmistusta. Digitaalisessa painamisessa haluttu informaatio tulostetaan tietokoneen muistista halutulle painoalustalle suoraan tai erillisen kuvasylinterin tai hihnan välityksellä. Digitaaliset painomenetelmät perustuvat ns. NIP- eli Non Impact -painotekniikoihin, joissa värin siirto tapahtuu ilman väriä siirtävän pinnan ja painoalustan fyysistä kosketusta. Erona perinteisiin painomenetelmiin, joissa värinsiirto tapahtuu paineen vaikutuksesta painonipissä, digitaalisessa painossa värinsiirto tapahtuu esimerkiksi sähköstaattisten voimien vaikutuksesta. (2.)

Digitaaliset painomenetelmät ovat mahdollistaneet painotuotteiden helpon muokattavuuden jokaisen painokerran jälkeen, ja peräkkäiset painotuotteet voivat olla täysin erilaisia. Tämä mahdollistaa hyvin personoidut tuotteet, ja näin ollen digitaalista painantaa on mahdollista tehdä hyvin erilaisissa mittakaavoissa, niin kotona kuin teollisuudessakin. Teknologiat peruserämuotoiltaan ovat hyvin samankaltaisia tulostuksen ja painamisen välillä, joten näiden nimikkeiden ero on hyvin häilyvä. (2.)

Digitaalisiksi painomenetelmiksi yleensä mielletään NIP- eli kosketuksettomien painotekniikoihin kuuluvat menetelmät. Eräs tapa luokitella digitaaliset painomenetelmät on jaotella ne tekniikat, joita käytetään painamiseen tuotantomittakaavassa. Nämä tekniikat ovat staattisen masterpainolevyn valotus painokoneessa ja painaminen offset-tekniikalla, vaihtuvan tiedon tulostamisen mahdollistava elektrofotografinen tulostus ja tuotantomittakaavainen, teollinen mustesuihkutulostus. Näistä tekniikoista viimeistä, mustesuihkutulostusta käsitellään omassa luvussaan myöhemmin. (2.)

Elektrofotografia eli xerografia eli lasertulostus on tällä hetkellä laajimmin käytetty digitaalinen tulostustekniikka mustavalko- ja väritulostuksessa. Tämän tekniikan periaatteena on muodostaa ensin näkymätön eli latentti kuva sähköisenä varauskuviona fotojohteiselle materiaalille. Tämän jälkeen kuvakohdan varauksen kanssa vastakkaismerkkisesti varatut väriainehiukkaset tarttuvat kuvakoh-

tiin, mistä ne siirretään joko suoraan tai jonkin siirtomekanismin kautta painoalustalle. Elektrofotografiassa kuvan muodostukseen ja värinsiirtoon kuuluu viisi eri vaihetta. Nämä vaiheet ovat valotus, kehitys, värin siirto painoalustalle, kiinnitys ja puhdistus. Nämä vaiheet on esitetty tarkemmin kuvassa 10. (2.)



KUVA 10. Elektrofotografian vaiheet (2, s. 95)

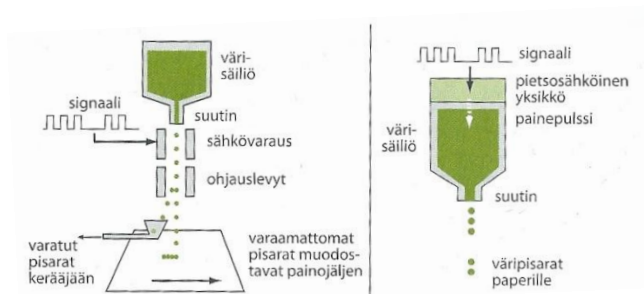
Muita digitaalisia tulostusmenetelmiä ovat elektrografia, ionografia, magnetografia, termografia ja elkografia. Edellä mainittujen tekniikoiden käyttö on ainakin vielä hyvin paljon vähäisempää kuin lasertulostuksen ja mustesuihkutekniikan. Elektrofotografiassa kuvanmuodostukseen käytetään elektronisädetä lasersäteen sijaan ja latenttikuva muodostetaan usein suoraan erikoispaperille, jossa on erityinen dielektrinen päällyste. Ionografiassa kuva-aiho muodostuu dielektrisel le kuvarummulle sähköisesti varautuneista ioneista, jotka tulostetaan erillisessä ionigeneraattorissa. Magnetografiassa kuvan muodostus perustuu nimensä mukaisesti magnetismiin. Latenttikuvaa muodostetaan magnetoituvalle metalli- rummulle, jolle siirretään magneettista väritooneria. Termografia perustuu lämmön avulla tapahtuvaan värinmuodostukseen. Suorassa termografiassa kuva muodostetaan lämpöherkällä materiaalilla päällystetylle erikoispaperille lämpökirjoittimella. Lämpökirjoitin muuttaa päällysteen väriä, joko kemiallisen reaktion kautta tai muuttamalla päällysteen olomuotoa. Epäsuorassa termografiassa väri siirretään lämmön avulla erilliseltä kantokalvolta. Elkografiassa latenttikuva muodostetaan nestemäiseen väriin sähkövirran avulla. Sähköpulssein vaikutuksesta väri saostuu kuvakohdista ja sitten ympärille jäänyt väri raakeloidaan pois ja saostunut väri siirretään painoalustalle. (2.)

2.1.8 Mustesuihku

Mustesuihku- eli inkjet-tulostuksen periaatteena on väriaineena toimivan musteen pisarointi ja johtaminen kuvasignaalin ohjaamana painoalustalle. Tulostusjälki saadaan aikaan kirjoituspäiden muodostamista mustepisaroista, joita ne tuottavat 75 000 kappaletta sekunnissa. Pisaravirran muodostamiseen on olemassa kaksi eri tekniikkaa, joiden mukaan erotellaan suihkutulostusmenetelmät. Edellä mainitut menetelmät ovat jatkuvan pisaroituksen menetelmä (engl. continuous stream) ja epäjatkuvan pisaroituksen menetelmä (engl. drop on demand eli DoD). (2.)

Jatkuvaan pisaroitukseen perustuvien menetelmien periaatteena on tuottaa jatkuva ja tasainen pisaravirta. Ne pisarat, joita ei ole tarkoitettu siirtymään painoalustalle, poikkeutetaan virrasta erityisten sähköisten ohjainlevyjen avulla ja kerätään jätevärisäiliöön. Jotta sähköinen poikkeutus saadaan onnistumaan, on pisarat varattu joko binääriperiaatteella tai multipoikkeutusperiaatteella. Binääriperiaatteessa pisarat ovat joko varattuja tai ei-varattuja ja multipoikkeutusperiaatteessa pisaralla on eri varaustaso, jonka avulla sitä on mahdollista ohjata. (2.)

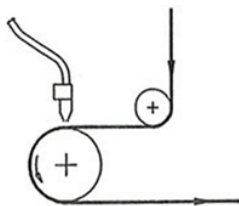
Drop on demand -periaatetta käyttävässä mustesuihkutekniikassa pisara tulostetaan vain tarvittaessa eli tulostuspään ollessa tulostettavan pisteen kohdalla. Musteen pisaroituminen saadaan aikaan lämpöenergian, pietsosähköisyyden tai elektrostaattisuuden avulla. Mustesuihkutekniikan tyypit on esitelty kuvassa 11. (2.)



KUVA 11. Mustesuihkutekniikan tyypit (2, s. 98)

Lämpöenergiaan perustuvia mustesuihkutulostimia kutsutaan termisiksi tai usein myös kuplamustetulostimiksi. Näissä tulostimissa muste kuumennetaan siten, että se höyrystyy ja kuplia muodostuu musteen sisälle. Näiden kuplien tarkoituksena on nostaa painetta mustesäiliössä, ja näin ollen paine pakottaa musteen suihkuamaan ulos säiliöstä. Pietsosähköistä menetelmää käyttävissä tulostimissa mustesäiliön tilavuutta pienennetään pietsosähköisen ilmiön avulla. Elektrostaattinen drop on demand -tekniikka on vielä kohtuullisen uusi keksintö. Tässä tekniikassa käytetään hyväksi sähkökenttää värin irrottamiseksi suuttimesta. (2.)

Tyypillisesti mustesuihkutekniikkaa on käytetty pienissä koti- ja toimistotulostimissa, mutta nykyään sitä pidetään yhtenä lupaavimmista tekniikoista nopean tuotantotulostamisen kannalta. Mustesuihkutekniikka mahdollistaa hyvin erilaiset painopinnat niin materiaaleiltaan kuin muodoltaankin, sillä se ei vaadi kontaktia painoalustan ja kuvapinnan välillä. Mustesuihkutekniikkaa voidaan käyttää myös rotaatiopainokoneissa ja tämän menetelmän periaate on esitelty kuvassa 12, jossa tulostuspää tulostaa painomateriaalille rivi kerrallaan materiaalin liikkeessä linjaa pitkin. Mustesuihkutekniikan ongelmia voidaan pitää yhteisen pinnan muodostamisen vaikeutta suuttimien tukkeutumisen mahdollisuuden vuoksi sekä hitautta, jotta riittävä tarkkuus säilytetään. (2.)



KUVA 12. Mustesuihkutekniikan periaate rotaatiokoneessa (3)

2.2 Painomateriaalit

Painomateriaalien kehittäminen on ollut ja tulee olemaan suurin haaste painettavan älykkyyden parissa. Erilaiset olosuhteet painotapahtuman aikana aiheuttavat haasteita materiaaleille. On otettava huomioon käyttölämpötilat, suoritus-teho, kerrosten väliset yhteydet ja niiden toiminen yhdessä, materiaalien vettyminen, liukeneminen, tarttuminen, kuivausprosessit kerrostusten välillä jne.

Näillä kaikilla on suuri merkitys tuotteen toiminnan kannalta. (1.)

Painomateriaaleista puhuttaessa on tehtävä jako materiaaleihin, joille painetaan ja materiaaleihin, joilla painetaan, eli painoväreihin. Myöhemmin nämä on eroteltu omiksi luvuikseen. Materiaalit-luvussa puhutaan materiaaleista, joille painetaan ja Painovärit-luvussa kerrotaan materiaaleista, joilla painetaan. Tässä yhteydessä painotutaan painettavaan elektroniikkaan ja sen painamiseen käytettäviin materiaaleihin.

2.2.1 Materiaalit

Yleisin painamiseen käytettävä materiaali on paperi. Papereita ja paksumpia kartonkeja on olemassa useita eri laatuksia eri käyttötarkoituksiin. Paperi- ja kartonkituotteiden lisäksi painomateriaaleina käytetään mm. kankaita, lasia, muoveja, metalloituja papereita ja silikonit tuotteen mukaan. Koska yleisimpiä painotuotteita ovat lehdet ja kirjat, on paperi kuitenkin yleisimmin käytetty painomateriaali halpuutensa ja käyttötarkoitukseen sopivuutensa vuoksi.

Halvan hinnan ja monien käyttömahdollisuuksiensa vuoksi paperi olisi erittäin houkutteleva materiaali myös painettavan älykkyyden valmistukseen, mutta sen suuri karheus ja absorboivuus aiheuttaisivat suuria ongelmia elektroniikan parissa, sillä painettavan älyn sovelluksissa pelkkä silmälle hyvännäköinen painopinta ei riitä, vaan sen on muodostettava yhtenäisiä alueita toivottujen ominaisuuksien, kuten johtavuuden, varmistamiseksi. Esimerkiksi painopinnan karheus aiheuttaa helposti katkoksia tai aukkoja painopintaan, joten painokerrosten on oltava paksumpia haluttujen toiminnallisuuksien varmistamiseksi. Näin ollen on pitänyt miettiä muita soveltuvia ja kustannustehokkaita painomateriaaleja, jotka soveltuvat käyttötarkoitukseen. Materiaalin tulisi kestää hyvin lämpöä ja kosteutta, sen tulisi olla riittävän taipuisaa ja jämääkää ja näiden lisäksi materiaalin tulisi olla riittävän edullista, jotta massatuotannosta saataisiin kannattavaa. On myös otettava huomioon se, että joissakin sovelluksissa on mahdollista käyttää hyväksi materiaalien ominaisuuksia uudella tavalla, kuten kosteuden imeytymistä esimerkiksi kosteusanturisovelluksissa. (1.)

Olemassa olevista materiaaleista aikaisemmin mainittujen vaatimuksien täyttäjäksi sopii parhaiten muovi. Painettavaan elektroniikkaan liittyvien sovellusten painomateriaalina taipuisa, ohut ja kestävä muovikalvo on erittäin hyvin toimiva.

Yleisimmin käytetty kalvomateriaali on polyeteenitereftalaatti eli PET eli polyesteri. PET:n lisäksi käytetään ainakin polyeteeninaftalaattia eli PEN:ää, polyimidiä eli PI:tä ja polykarbonaattia eli PC:tä. Muita taipuisia materiaaleja, joita käytetään taipuisien elektroniikkatuotteiden valmistukseen, ovat nestekidepolymeeri eli LCP ja teflon eli PTFE, joista teflon ei sovellu jatkuvasti taipuvien sovellusten materiaaliksi. (4; 5; 6.)

Aikaisemmin mainituista PI:llä on erinomainen lämmönkesto niin kylmissä kuin kuumissakin olosuhteissa ja se säilyttää taipuisuutensa myös kylmässä. PI on hinnaltaan kallis verrattuna toiseen suosittuun materiaaliin eli PET:hen. PET on lämmön kestoaltaan huomattavasti huonompi ja ei sovellu juottamiseen matalan sulamislämpötilansa vuoksi. Lisäksi se ei myöskään siedä kylmää PI:n tavoin vaan muuttuu hauraaksi. Edullisuutensa vuoksi PET on yleisesti käytetty materiaali. PEN materiaali on sekä ominaisuuksiltaan että hinnaltaan kompromissi PI:n ja PET:n välillä, sillä se on kustannuksiltaan edullisempi kuin PI, mutta ominaisuuksiltaan parempi kuin PET. Nestekidepolymeerit ovat myös mahdollinen vaihtoehto taipuisan elektroniikan alustaksi. Niillä on erittäin hyvät sähköiset ominaisuudet, alhainen kosteuden imukyky, hyvä kierrätettävyys ja taivutuksen kesto. (4; 5.)

Painomateriaaleissa on otettava huomioon myös ne materiaalit, joita käytetään tasopainokoneissa. Näissä koneissa on mahdollista painaa esimerkiksi päällystetyille kartongeille tai pahveille, erilaisille muovi- ja lasilevyille ja jopa silikonille. Nämä materiaalit eivät sovellu niinkään taipuisaan elektroniikkaan, mutta painettuun kyllä. Näitä materiaaleja voidaan käyttää hyväksi sellaisissa painetun elektroniikan sovelluksissa, joissa taipuisuus ei ole välttämätöntä, kuten älypak-
kaukset, erilaiset sensorit ja anturit yms. (1.)

Painomateriaalin valinnassa on otettava huomioon se, mitä ollaan tekemässä, mihin olosuhteisiin tuote on tulossa ja mikä on tuotteen kustannustehokkuus yms. On otettava myös huomioon materiaalin ominaisuudet ja se, voidaanko niitä hyödyntää suunnitellessa tuotteen rakennetta. Materiaaleja pyritään kehittämään jatkuvasti paremmin painettavaan elektroniikkaan soveltuviksi, jolloin on mahdollista ottaa huomioon myös materiaalien ominaisuudet suunnittelussa ja hyödyntää niitä entistä paremmin. Tulevaisuudessa pinnoitettu paperi on myös

yksi vaihtoehto painomateriaaliksi, jotta saataisiin yhdistettyä tasapintaisen substraatti ja halpa paperi. Pinnoitetun paperin käyttöä painomateriaalina tullaan kokeilemaan ja tutkimaan tulevaisuudessa enemmän.

2.2.2 Painovärit

Painettava elektroniikka on tuonut uusia haasteita musteiden suunnittelulle ja valinnalle. On tullut entistä tarpeellisemmaksi saada jo itse musteisiin sähköisiä ominaisuuksia, kuten johtavuutta, resistiivisyyttä, eristävyyttä jne. Mitä enemmän ominaisuuksia saadaan sisällytettyä jo itse musteisiin, sitä monipuolisempia sovelluksia on mahdollista tehdä ja samalla saadaan yksinkertaistettua rakenteita ja vähennettyä painokerroksia. Suurimpia vaatimuksia musteille ovat sähköisten ominaisuuksien lisäksi prosessoitavuus nestemäisessä muodossa, kuten liuoksen laatu, dispersio ja suspensio. (1; 5; 6.)

Painettavassa elektroniikassa voidaan hyödyntää erilaisia liuospohjaisia seoksia, jotka sisältävät sekä orgaanisia että epäorgaanisia aineita. Tyypillisiä painamiseen käytettyjä epäorgaanisia materiaaleja ovat hopea, kulta ja kupari. Nämä metallit esiintyvät musteissa pienten nano- tai mikropartikkeleiden seoksena. Edellä mainittuja metallipohjaisia johtavia musteita käytetään johtavien rakenteiden, kuten johdinten, antennien ja RFID-tagien, painamiseen. Metallipohjaisten musteiden lisäksi on olemassa hiilipohjaisia musteita, jotka sisältävät hiilipartikkeleita tai -hiutaleita. Hiilipohjaisia musteita voidaan käyttää ainakin vastusrakenteissa, elektromagneettisten häiriöiden ja radiotaajuuksien suodatuksessa. (1; 5; 6.)

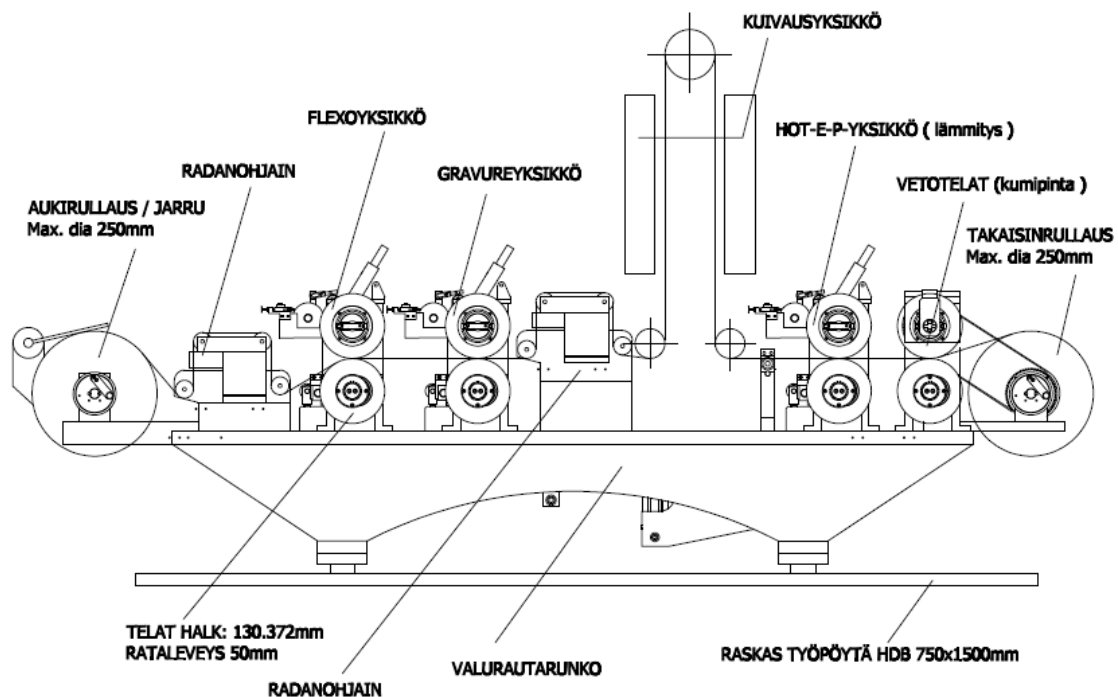
Orgaanisilla painomateriaaleilla tarkoitetaan yleensä erilaisia polymeerejä. Polymeerien kehitys nestemäiseen muotoon oli suuri harppaus painettavan elektroniikan alalla. Polymeerejä voidaan käyttää useisiin eri tarkoituksiin, sillä ne ovat kemiallisesti muokattavissa haluttuihin ominaisuuksiin sopiviksi. Hyvin johtavia polymeerejä voidaan käyttää johtimina, elektromagneettisten häiriöiden suodatuksen, pattereihin, kondensaattoreihin ja vastuksiin. Heikosti johtavia polymeerejä voidaan käyttää antistaattisiin sovelluksiin ja korroosion suoja-pinnoitteisiin. Puolijohdetasoisia polymeerejä sen sijaan voidaan käyttää OLED- ja OFET-sovelluksissa, aurinkopaneeleissa, sensoreissa ja näytöissä. Käytännös-

sä vain taivas on rajana sovellusmahdollisuuksissa, mikäli kehitys jatkuu tällaisena. (1; 5; 6.)

3 R-2-R-TEKNIikka

R-2-R-tekniikalla eli roll-to-roll-tekniikalla tarkoitetaan tekniikkaa, jossa materiaali kulkee yhtenäisenä rullalta toiselle koneen läpi. Rullalta rullalle -tekniikka on hyvin yleinen esimerkiksi kirja- ja lehtipainoissa ja teollisuudessa, mutta nyt sitä on alettu soveltaa myös painettavan älykkyyden sovelluksiin mahdollisuuksiensa vuoksi. (7.)

Rullalta rullalle -tekniikassa käytetään hyväksi rotaatiopainokoneita, joissa voi painoyksikkönä olla esimerkiksi fleksopaino-, syväpaino-, silkipaino-, laakapaino-, kuumapuristus- tai mustesuihkuyksikkö. Rullalta rullalle tekniikka mahdollistaa suurempien painoalueiden ja painosmäärien painamisen teollisessa mittakaavassa. Tekniikasta riippumatta on rullalta rullalle painaminen tulevaisuutta tasopainokoneisiin verrattuna. Kun päästään kaupallisesti valmistettaviin tuotteisiin, saadaan niitä painettua nopeasti, paljon ja edullisesti tasopainoon verrattuna. Kuvassa 13 on pienikokoinen R-2-R -tekniikkaa käyttävä laite, mutta periaate on sama myös tuotannossa käytettävissä suurikokoisissa painolaitteissa. Kuvasta on selvästi nähtävissä rullalta rullalle laitteen keskeisimmät osat.



KUVA 13. R-2-R -laitteen esimerkkirakenne

4 VASTUS

Vastus on yleisesti elektroniikassa käytettävä komponentti, jonka tehtävänä on rajoittaa virran kulkua, synnyttää jännitehäviöitä sekä mahdollistaa jännitteiden jako halutussa suhteessa. Vastuksen tärkein ominaisuus on resistanssi eli sen kyky vastustaa virran kulkua. Resistanssin suuruutta kuvataan tunnuksella R ja sen perusyksikkö on ohmi. Ohmia merkitään kreikkalaisella kirjaimella Ω . (8; 9.)

4.1 Perusperiaatteet ja ominaisuudet

Ohmin lain mukaisesti vastuksen läpi kulkevan sähkövirran I katsotaan olevan suoraan verrannollinen vastuksen päiden välillä vaikuttavaan jännitteeseen U , kuten kaavassa 1. (8; 9.)

$$U = RI$$

KAAVA 1

U = vastuksen yli vaikuttava jännite (V)

R = vastuksen resistanssi (Ω)

I = vastuksen läpi kulkeva sähkövirta (A)

Resistanssin lisäksi vastuksille yleensä määritellään myös niiden tehonkestoisuus. Tehonkestoisuus ilmaisee suurimman tehohäviön (P), jonka vastus kestää pysyen sille määritellyissä toleransseissa. Tehohäviön suuruutta kuvataan yksiköllä watti (W). Tiedettäessä vastuksen tehonkestoisuus on mahdollista laskea sille myös virran- ja jännitteen kesto. Jännitteeseen kytketyssä vastuksessa syntyy kaavan 2 mukainen tehohäviö. (8; 9; 10.)

$$P = UI$$

KAAVA 2

P = vastuksen tehohäviö (W)

U = vastuksen yli vaikuttava jännite (V)

I = vastuksen läpi kulkeva sähkövirta (A)

Vastukselle määritelty tehonkestoisuus pätee vain tiettyyn lämpötilaan saakka ja ylitettäessä annettu rajalämpötila täytyy vastukseen vaikuttavaa tehohäviötä pienentää ylikuumenemisen välttämiseksi (8; 9; 10.).

Vastukset voidaan kytkeä joko rinnan eli vierekkäin tai sarjaan eli peräkkäin. Sarjaan kytkettäessä kokonaisvastusarvo kasvaa ja rinnan kytkettäessä se pienenee. Näin ollen kytkennän sisäisiä jännitteitä on mahdollista säädellä halutuksi mitoittamalla vastuksien arvot ja muodostamalla kytkentä käyttötarkoitukseen sopivalla tavalla. (8; 9; 10.)

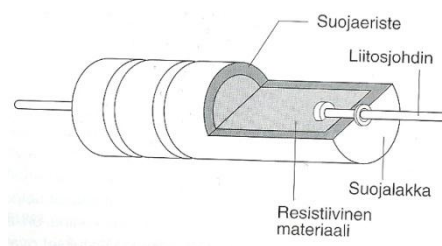
4.2 Vastustyytit

Vastuksia on olemassa useaa eri tyyppiä. Vastukset voidaan jakaa lineaarisiin ja epälineaarisiin vastuksiin. Vastuksen lineaarisuudella tarkoitetaan sitä, että ympäristöolosuhteet eivät vaikuta sen resistanssiarvoon. Epälineaarisilla vastuksilla sen sijaan resistanssiarvo ei ole vakio, vaan se riippuu esimerkiksi ympäristön lämpötilasta tai valaistuksen voimakkuudesta. (8; 9; 10.)

4.2.1 Lineaariset vastukset

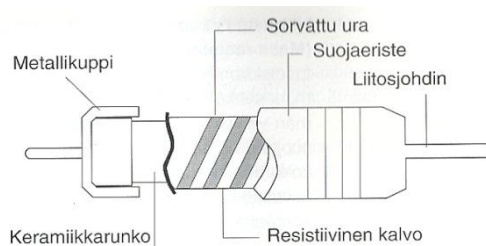
Lineaariset vastukset voidaan vielä jakaa kiinteisiin vastuksiin ja säädettäviin vastuksiin. Kiinteitä vastuksia ovat massavastukset, kalvovastukset, lankavastukset ja pintaliitosvastukset. Säädettäviä vastuksia ovat jatkuväsäätöiset eli potentiometrit, työkalusäätöiset eli trimmeripotiometrit ja dekadivastukset. (8; 9; 10.)

Massavastus on kaikkein halvin yleisvastus ja se on halvan hintansa ja hyvän luotettavuutensa vuoksi yleinen halvoissa, suurina sarjoina valmistettavissa kulutuselektronikan laitteissa. Massavastukset ovat toiminnaltaan luotettavia, mutta ne ovat huonompia toisiin vastustyyppihin verrattuna kohinaltaan ja muilta sähköisiltä ominaisuuksiltaan. Massavastuksen resistiivinen osa muodostuu hiilikvartsiseoksesta, joka on suojattu eristemassalla ja suojalakalla. Massavastuksen rakenne on kuvan 14 mukainen. (8; 9; 10.)



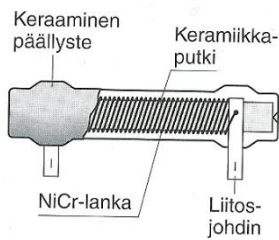
KUVA 14. Massavastuksen rakenne (8, s. 103)

Kalvovastuksia on olemassa useaa eri tyyppiä, kuten hiili- ja metallikalvovastuksia ja metallilasitettuja vastuksia. Kaikki kolme ovat rakenteeltaan samankaltaisia, mutta eroavat toisistaan vain valmistusmateriaalinsa perusteella. Kaikki kalvovastukset koostuvat keraamisesta rungosta, jonka päälle on höyrystetty resistiivinen kalvo. Hiilikalvovastuksen kalvo on hiiltä (C), metallikalvovastuksen kalvo nikkelikromia (NiCr) ja metallilasitettujen tinaoksidia (SnO_2). Rakenteeltaan kalvovastuksen ovat sauvamallisia, kuten massavastuksetkin ja ne suojataan lakkaamalla tai suojamassalla. Kalvovastuksen resistanssi riippuu kalvon paksuuden lisäksi kalvoon sorvatusn spiraalin muodosta. Luotettavuudeltaan kalvovastukset eivät ole yhtä hyviä, kuin massavastuksen ohuen kalvon vaurioherkkyyden vuoksi, mutta kohina on pienempää ja vakavuus parempi. Kalvovastuksen rakenne on kuvan 15 mukainen. (8; 9; 10.)



KUVA 15. Kalvovastuksen rakenne (8, s.104)

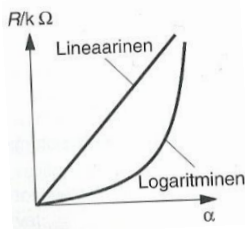
Lankavastuksia käytetään teho- ja tarkkuusvastuksina. Lankavastus tehdään kiertämällä konstantaani- (kuparin Cu ja nikkelin Ni seos) tai krominikkelilankaa (CrNi) spiraalimaisesti keraamisen rungon ympärille. Molempien materiaalien vakavuus on hyvä, joten niiden resistanssiarvo on lähes riippumaton lämpötilasta. Tämän lisäksi suurikokoisia lankavastuksia on mahdollista käyttää myös tehovastuksina. Lankavastukset suojataan lakkaamalla tai emaloimalla. Koska lankavastusten rakenne on paljon kelan kaltainen, niillä on suuri induktanssi, joten ne eivät sovellu suurtaajuus käyttöön. Lankavastuksen rakenne on kuvan 16 kaltainen. (8; 9; 10.)



KUVA 16. Lankavastuksen rakenne (8, s.105)

Pintaliitosvastukset ovat aikaisemmin mainittuihin vastuksiin verrattuna hyvin pienikokoisia, suoraan kytkentälevyn pintaan juotettavia komponentteja. Pintaliitosvastuksissa ei ole liitostavan takia varsinaisia johdinlankoja, kuten muissa vastustyypeissä. Pintaliitosvastus muodostuu keraamisesta kotelosta, jonka päissä on kontaktit. Näiden kontaktien välissä on resistiivinen metallilasitekerros. Päällimmäisenä komponentissa on vielä suojakerros. (10.)

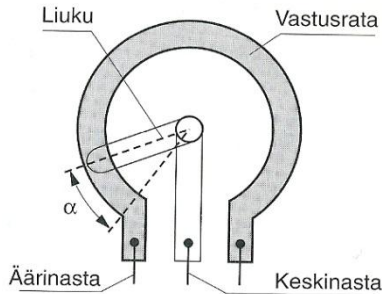
Aikaisemmin mainittujen lisäksi säätövastukset kuuluvat lineaaristen vastusten joukkoon. Säädetäviä vastuksia käytetään sellaisissa kytkennöissä, joissa tarvitaan helppoa resistanssinsäätömahdollisuutta. Säädetävät vastukset jaetaan, kuten aikaisemmin mainittiin, jatkuvasäätöisiin (potentiometri) ja työkalusäätöisiin (trimmeri). Potentiometrejä käytetään sellaisissa säädetävissä kohteissa, joiden säätely on sallittu tavalliselle laitteen käyttäjälle. Potentiometrejä esiintyy esimerkiksi radion äänenvoimakkuuden ja -sävyn säätimenä. Potentiometrejä valmistetaan sekä lineaarisia että logaritmisia. Näiden tyyppien erona on se, että toisen vastusarvo muuttuu säädetäessä lineaarisesti ja toisen logaritmisesti akselin kiertymiskulman (α) funktiona kuvan 17 mukaisesti. (8; 9; 10.)



KUVA 17. Potentiometrin säätökäyrä (8, s.107)

Potentiometrin periaatteellinen rakenne on kuvan 18 kaltainen. Todellinen rakenne on periaatteeltaan kaikissa potentiometrityypeissä sama, mutta vaihtelee

toteutukseltaan. Potentiometrejä on olemassa useaa eri tyyppiä, kuten liukusäätöpotentiometri, tandempotentiometri, kaksikkopotentiometri, monikierrospotentiometri, säädettävä lankavastus ja dekadivastus. (8; 9; 10.)



KUVA 18. Potentiometrin rakenneperiaate (8, s.107)

Trimmerien avulla suoritetaan laitteen harvoin tarvittavat perussäädöt, jotka on jätettävä ammattitaitoisen henkilön hoidettaviksi. Useiden laitteiden sisäiset perussäädöt asetetaan suoraan levyllä asennettujen trimmerien avulla. Sääto tapahtuu laitteen valmistuksen, virityksen, korjauksen tai huollon yhteydessä. (8; 9; 10.)

4.2.2 Epälineaariset vastukset

Epälineaarisia vastuksia käytetään sellaisissa kohteissa ja virtapiireissä, joiden on reagoitava toimintaympäristössä tapahtuviin fysikaalisiin muutoksiin. Epälineaaristen vastusten resistanssi riippuu ympäristössä vallitsevista olosuhteista. Tätä ominaisuutta voidaan käyttää hyväksi monissa mittaus- ja säätösovelluksissa. Epälineaarisiin vastustyyppeihin kuuluvat NTC (Negative Temperature Coefficient), PTC (Positive Temperature Coefficient), LDR (Light Dependent Resistor) ja VDR (Voltage Dependent Resistor). Näistä NTC ja PTC ovat lämmöstä riippuvaisia, LDR valosta riippuvainen ja VDR jännitteestä riippuvainen. (8; 9; 10.)

Koska NTC- ja PTC-vastukset ovat riippuvaisia ympäristössä vallitsevasta lämpötilasta, niitä usein kutsutaan myös termistoreiksi. Ne valmistetaan piistä (Si) tai muista puolijohdemateriaaleista, joiden sähkönjohtavuutta ja resistanssia säätelee lämpötila. Termistorien toiminta perustuu siihen, että niiden materiaalin sähkönjohtavuus eli varauksen kuljettajien määrä riippuu lämpötilasta. NTC-

vastuksia käytetään mm. lämpötila-antureina ja laitteiden alkukäynnistysvirran rajoittamiseen. PTC-vastuksia käytetään lämpöelementteinä, ylikuormitussuojina ja kosketinkipinöinnin estämiseen. (8; 9; 10.)

LDR-vastuksissa käytetään hyödyksi valon vaikutusta puolijohdemateriaalien sähköisiin ominaisuuksiin. LDR-vastuksia käytetään mm. hämäräkytkimissä valonilmaisimien ja valaistusmittareiden antureina. (8; 9; 10.)

VDR-vastukset eli varistorit valmistetaan piikarbidista (SiC), sinkkioksidista (ZnO) tai titaanioksidista (ZnO). Varistorin toimintaperiaatteena on sen resistanssin pieneneminen äkillisesti, kun sen jännite ylittää määrätason. LDR-vastus on aina kytkettävä virtapiiriin määräsuuntaisesti ja sen miinusnapa on merkitty valkoisella pisteellä. Varistoreja käytetään ylijännitesuojina, jännitteen vakavointipiireissä ja kosketinkipinöinnin estämiseen. (8; 9; 10.)

5 PAINETTU VASTUS

Tämän luvun tarkoituksena on perehtyä painomenetelmien avulla tuotettuihin vastuksiin. Tarkoituksena on selvittää painetun vastuksen materiaali ja geometria vaihtoehdot, toimintaa kuvaavat parametrit sekä toimintaolosuhteiden vaikutus vastuksen toimintaan. Aikaisemmassa luvussa perehdyttiin perinteisen vastuskomponentin toimintaan sekä ominaisuuksiin, ja painetun vastuksen yhteydessä on tarkoitus perehtyä painamalla tehdyn komponentin vaatimuksiin. Vastukseen liittyviä perussuureita ei ole tässä luvussa enää käsitelty uudelleen, koska ne on käsitelty jo edellä olevassa luvussa.

5.1 Materiaali- ja geometriavaihtoehdot

Painetun vastuksen rakenne on hyvin yksinkertainen. Painettu vastuskomponentti koostuu hyvin johtavasta materiaalista tehdyistä kontaktialueista eli padoista ja niiden väliin vastuspastalla painetusta rakenteesta. Rakenne on kuvan 19 kaltainen, jossa mustalla on esitetty vastuspastalla painettu alue ja mustalla rajatut valkoiset alueet ovat kontaktipintoja. (11.)



KUVA 19. Painetun vastuksen periaatteellinen rakenne

Painetun vastuksen resistanssiarvon säätäminen tapahtuu pääasiassa joko muuttamalla vastusrakenteen kokoa tai muuttamalla vastuspastan sekoitussuhteita, jolloin pastan johtavuus muuttuu. Kapea ja pitkä vastusrakenne aiheuttaa suuremman resistanssin kuin leveä ja lyhyt. Kuvainnollisesti ajatellen vesi virtaa paremmin leveässä kuin kapeassa joessa ja vastuksen tehtävänähän on rajoittaa virran eli tässä esimerkissä veden kulkua. Vastuksen resistanssiarvo muodostuu painetussa komponentissa neliöresistanssin perusteella, mikä esitellään myöhemmin tarkemmin.

Tähän työhön liittyviä vastuksia painettiin toistopituudelle 40 kappaletta, joista kaikki ovat fyysisesti erikokoisia toisiinsa verrattuna. Näin ollen toteutettiin 40 erilaista geometriavaihtoehtoa periaatteella, jossa vastuksia painettiin viiden kappaleen sarjoissa kahdeksaa eri pituutta. Jokaisessa viiden sarjassa vastuksen pituus oli sama, mutta leveys vaihteli siten, että ylhäältä alaspäin siirryttäessä vaihtuu neliömäärä 5, 4, 2,5, 2 ja 1, joten sarjassa ylimpänä olevalla vastuksella on suurin resistanssi ja alimmalla pienin ja sarjojen kesken ylimpien pitäisi vastata toisiaan resistanssiarvoiltaan, samoin toisten jne. Edellä selitetty geometriakuvaus löytyy painokuvioista, joka on tämän työn liitteenä 2. Liitteen ensimmäisellä sivulla näkyy toistopituuden maksimimitat kyseessä olevalla painolaitteella, toisella sivulla näkyy ensimmäisen johtavan kerroksen painokuvio, kolmannella sivulla näkyy eristekerroksen painokuvio, neljännellä sivulla näkyy toisen johtavan kerroksen painokuvio ja viimeisellä sivulla näkyy vastuspastan painokuvio.

Vastus koostuu materiaaleiltaan siis hyvin johtavista padeista ja heikosti johtavasta vastusrakenteesta. Vastusrakenne ei voi olla materiaaliltaan eristävä, jotta se toimii toivotulla tavalla ja vain rajoittaa virran kulkua eikä estä sitä kokonaan. Padit ovat materiaaliltaan yleensä metallipohjaisia johtavia musteita, kuten hopeaa, kultaa tai kuparia sisältäviä. Mahdollisuus on käyttää myös muita materiaaleja, mutta niiden on oltava hyvin johtavia. Vastusrakenne on siis materiaaliltaan heikosti johtavaa ainetta, jota kutsutaan usein vastuspastaksi. Vastuspasta voi olla materiaaliltaan ainakin käyttötarkoitukseen sopiva nestemäinen polymeeri, keraaminen aine tai hiilipohjainen musteseos. Kaikkien käytettävien materiaalien on oltava saatavilla nestemäisessä muodossa. Materiaalien valinnassa on otettava huomioon komponentin käyttötarkoitus, käyttöolosuhteet, juotoksien tarve ja kustannustehokkuus. (11.)

5.2 Toimintaa kuvaavat parametrit

Tässä luvussa on kuvattu lähinnä painettavaan vastuskomponenttiin liittyviä toimintaa kuvaavia parametreja. Vastuksen tavallisimpia sähköisiä ominaisuuksia on kuvattu edellisessä luvussa, jossa puhutaan perinteisestä vastuskomponentista.

5.2.1 Neliöresistanssi

Yleensä resistanssi on määriteltävissä materiaalin resistiivisyyden ja pituuden L suhteesta poikkipinta-alaan A kaavan 3 mukaisesti. (12.)

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{KAAVA 3}$$

R = vastuksen resistanssi

ρ = materiaalin resistiivisyys

L = vastuksen pituus

A = vastuksen poikkipinta-ala

Näin ollen resistanssi voidaan myös määrittää materiaalin resistiivisyyden ρ ja pituuden L suhteesta leveyteen W ja paksuuteen t kaavan 4 mukaisesti. (12.)

$$R = \rho \frac{L}{Wt} \quad \text{KAAVA 4}$$

R = vastuksen resistanssi

ρ = materiaalin resistiivisyys

L = vastuksen pituus

W = vastuksen leveys

t = kalvon paksuus

Usein ohuiden kalvomaisten rakenteiden poikkipinta-alan määrittäminen on varsin haasteellista, joten yleensä näissä tapauksissa on tarkoituksen mukaisempaa käyttää resistanssin selvittämiseen neliöresistanssia. Prosessointitavasta johtuen kalvon paksuus on leveydestä ja pituudesta riippumatta lähellä samaa kaikkialla, joten tämä tapa tarkastella asiaa on varsin luotettava. Yhdistettäessä resistiivisyys ja paksuus voidaan resistanssi kirjoittaa kaavan 5 mukaisesti. (12.)

$$R = \frac{\rho}{t} \cdot \frac{L}{W} = R_s \frac{L}{W} \quad \text{KAAVA 5}$$

R = resistanssi

ρ = materiaalin resistiivisyys

t = kalvon paksuus

L = vastuksen pituus

W = vastuksen leveys

R_s = materiaalista riippuvainen neliöresistanssi

Neliöresistanssin yksikkönä käytetään yleensä merkintää ohm/sq tai Ω / \square . Neliöresistanssi R_s on aina vakio, mikäli vastuksen pituus L ja leveys W ovat yhtä suuria eli komponentti pysyy neliön muotoisena. Näin ollen vastuksen resistanssi R on yhtä suuri kuin neliöresistanssi R_s , kun pituus L on yhtä suuri kuin leveys W kaavan 6 mukaisesti. (12.)

$$R = R_s, \text{ kun } L = W$$

KAAVA 6

R = vastuksen resistanssi

R_s = neliöresistanssi

L = vastuksen pituus

W = vastuksen leveys

Näin ollen painetun vastuksen resistanssi R on olemassa olevien neliöiden lukumäärä kerrottuna neliöresistanssilla R_s , joten resistanssi siis riippuu neliöiden määrästä, ei niinkään neliön koosta (12).

5.2.2 Toleranssi

Toleranssien tarkoituksena on pitää yllä tuotteiden laatua valmistuksessa. Toleranssi on raja, jonka sisällä komponentin arvon on oltava, jotta se on vielä hyväksyttävissä. Vastusten toleranssien tarkoituksena on pitää vastusten resistanssiarvot mahdollisimman samoina eri komponenttien välillä, jotta ne toimisivat halutulla tavalla käyttökohteessa. Toleranssit ilmoitetaan vastusten tapauksessa yleensä prosentteina eli kuinka monta prosenttia arvo saa enintään poiketa ilmoitetusta arvosta. (9.)

Tämän työn tarkoituksena oli ottaa selvää, millaisella tasolla painetut komponentit ovat tällä hetkellä, joten komponenteista selvitettiin toleranssi laskemalla, jotta saadaan selville, millä vaihtelualueella komponenttien vastusarvot liikkuvat.

Toleranssin selvittäminen aloitetaan selvittämällä minimi- ja maksimiarvot, ja koska tässä työssä painettiin 40 erikokoista vastusta toistopituudelle, tulee mi-

nimi- ja maksimi-arvojen 40 molempia. Edellä mainittujen arvojen lisäksi on selvitettävä myös keskiarvot. Kun keskiarvot ja minimi- sekä maksimi-arvot ovat selvillä, lasketaan minimi- ja maksimiprosentit eli kuinka paljon minimi- ja maksimi-arvo poikkeavat keskiarvosta. Keskiarvo \bar{x} lasketaan kaavan 7 mukaisesti.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{(x_1 + \dots + x_n)}{n} \quad \text{KAAVA 7}$$

\bar{x} = keskiarvo

n = otoksien lukumäärä

Minimiprosentti saadaan selville kaavan 8 mukaisesti.

$$\text{minimi}\% = \left(1 - \frac{\text{minimi}}{\text{keskiarvo}}\right) \cdot 100 \quad \text{KAAVA 8}$$

Maksimiprosentti saadaan selville kaavan 9 mukaisesti.

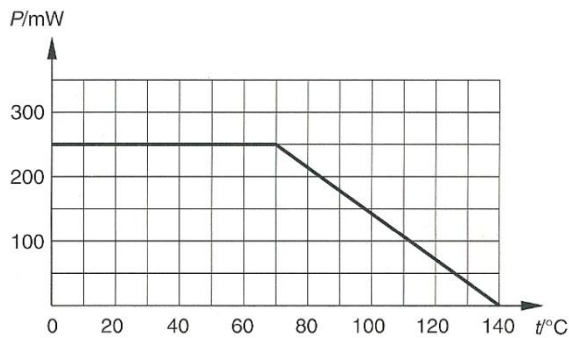
$$\text{maksimi}\% = \left(\frac{\text{maksimi}}{\text{keskiarvo}} - 1\right) \cdot 100 \quad \text{KAAVA 9}$$

Kun minimi- ja maksimiprosentit on selvitetty, verrataan niitä toisiinsa ja valitaan arvoista suurempi toleranssiksi kyseiselle sarjalle. Tästä toleranssista saadaan selville kyseisen tuote-erän maksimihajonta. Usein kuitenkin valmistustoleranssiksi on asetettu jokin tietty arvo, jonka alapuolelle komponenttien tulisi osua, ja tässä tapauksessa toleranssin ulkopuolelle menevät komponentit hylätään.

Painettaessa komponentteja rullalta rullalle tekniikalla olisi hyvä ottaa toleransseissa huomioon myös kahden saman komponentin välinen etäisyys ja etäisyyden vaikutus komponenttien arvoihin sekä kahdelle eri rullalle painettujen komponenttien väliset erot toleranssiarvoissa. Tätä työtä varten painettujen komponenttien tapauksessa tämä oli mahdotonta, sillä näytteinä olevat toistopituudet oli irrotettu toisistaan, joten on mahdotonta tietää miten ne ovat sijainneet keskenään ja millainen etäisyys milläkin komponentilla on ollut toiseen. Myöskään komponentteja ei painettu kuin yhdelle rullalle, joten ei voida verrata kahdella eri rullalla olevia komponentteja toisiinsa.

5.2.3 Tehonkesto

Vastuksen tehonkesto määritellään suurimman sallitun tehohäviön kautta, kuten aikaisemmassa luvussa käsiteltäessä perinteisiä vastuksia. Usein ajatellaan, että komponentin suurin tehonkesto on se teho, jolla komponentin arvo pysyy toleransseissa. Usein vastuskomponentin tehonkestoisuus ilmoitetaan datalehdissä ns. tehonvähennyskäyrällä, josta käy ilmi, kuinka suurta tehoa komponenttiin saa syöttää missäkin toimintaympäristön lämpötilassa. Tehonvähennyskäyrä voi olla kuvan 20 esimerkin kaltainen.



KUVA 20. Vastuksen tehonvähennyskäyrä (8, s. 101)

Tehonkesto on mahdollista tutkia syöttämällä komponenttiin eri jännitteitä, mitata komponentin läpi kulkeva virta, laskea tehohäviö ja tällä tavalla tutkia, kuinka suurta tehoa komponentti kestää pysyen kuitenkin toimintakuntoisena. Mikäli komponentin resistanssiarvot ovat hyvin suuria, on vaikeaa saada tavallisimpien käyttöjännitteiden avulla virta nousemaan niin suureksi, että tehohäviö olisi merkittävä.

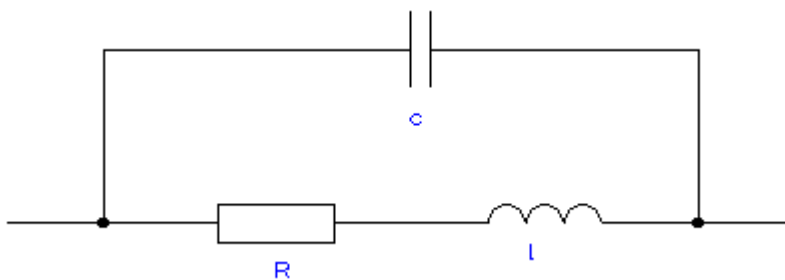
5.2.4 Vastinpiiri

Vastinpiirillä tai vastinkytkennällä tarkoitetaan kytkentää, jossa otetaan huomioon myös komponentissa vaikuttavat muiden komponenttien ominaisuudet eli parasiittiset komponentit. Tällä tarkoitetaan sitä, että vastuksella on myös kapasitiivisia ja induktiivisia ominaisuuksia tietyissä olosuhteissa, ja usein puhutaan myös suurtaajuusominaisuuksista tässä yhteydessä. Yleensä katsotaan vastuksen toimivan puhtaasti vastuksena matalilla taajuuksilla (taajuus alle 100 kHz), mutta kun vastukseen vaikuttaa suuremmat taajuuudet, alkaa sillä olla resistans-

sin lisäksi hajakapasitansseja ja hajainduktansseja, jotka vaikuttavat komponentin toimintaan. (9.)

Parasiittisten komponenttien katsotaan vaikuttavan vastuksen toimintaan siten, että resistanssin ollessa pieni on sarjainduktanssin vaikutus vastukseen suuri ja resistanssin ollessa suuri on hajakapasitanssin vaikutus vastukseen suuri, sen muodostaessa ohitustien suuritaajuisille virroille (9).

Vastinpiiri esitetään yleensä kuvan 21 mukaisella kytkennällä, jossa nk. parasiittiset komponentit on esitetty pienillä kirjaimilla.



KUVA 21. Vastuksen sijaiskytkentä

5.2.5 Toimintaolosuhteiden vaikutus

Koska elektroniikkalaitteet, komponentit, sensorit ja anturit saattavat joutua käyttötarkoituksensa vuoksi hyvinkin erilaisiin toimintaympäristöihin, on niiden olosuhteiden kestoa hyvä tutkia, jotta ne soveltuisivat mahdollisimman hyvin käyttötarkoitukseensa ja olisivat pitkäikäisiä. Erilaiset lämpötilat ja ilmankosteudet saattavat heikentää komponentin toimintaa ja rakenteita tai jopa tuhota sen. (13.)

On olemassa olosuhdetestausmittauksia, joissa muutetaan pelkkää lämpötilaa ja mittauksia, joissa lämpötilan lisäksi vaikuttavana tekijänä on kosteus. Pelkäättään lämpötilaan perustuvia mittauksia kutsutaan lämpösyklitesteiksi. Lämpösyklitestissä lämpötila muuttuu hitaasti lämpötilasta toiseen, mutta on olemassa myös ns. lämpösokkitestejä, joissa lämpötilaa muutetaan nopeasti. Tällöin komponenttiin kohdistuva rasitus on suurempi. Testeissä käytettävät lämpötilarajat valitaan kyseessä olevan tuotteen mukaan, mutta yleensä ne ovat $-55 - +130\text{ }^{\circ}\text{C}$, kun kyseessä on elektroniikkaan liittyvä rasitustesti. Testin kesto on

muutamista minuuteista jopa 1000 tuntiin. Usein testi lopetetaan vasta, kun selkeää hajoamista on havaittavissa. (13.)

Edellä mainittujen testityyppien lisäksi on olemassa olosuhdetestejä, joissa komponenttiin vaikuttaa lämpötilan lisäksi kosteus. Kosteus vaikuttaa komponenteissa monella tapaa, kuten imeytymällä rakenteisiin, aiheuttamalla korroosiota ja heikentämällä liitoksia. Yleisimmin käytettäviä testejä ovat kiihdytetyt lämpötila- ja kosteusrasitustestit kuten HAST (engl. highly accelerated temperature and humidity stress test) tai painekammiotesti PCT (engl. pressure cooker test) sekä THB (engl. steady state temperature humidity bias life test). Kaikki edellä mainitut testityypit ovat luonteeltaan pitotestejä, mutta kosteutta ja lämpötilaa on mahdollista muuttaa halutun syklin mukaisesti testin aikana. Testien lämpötilarajat ja kosteudet on määriteltä standardissa. Esimerkiksi THB-testissä on lämpötilaksi määritetty 85 °C ja kosteudeksi 85 % ja testin kestoksi 1000 tuntia.(13; 14.)

Olosuhdetestauksen merkitys on suuri, mikäli halutaan saada aikaan tietyissä olosuhteissa hyvin kestäviä ja toimivia tuotteita ja komponentteja. Esimerkiksi vastuksista voidaan tutkia komponentin resistanssiarvon muutoksia lämpötilan ja kosteuden vaikutuksesta. Olosuhdetestien avulla saadaan valittua oikeat valmistusmateriaalit käyttötarkoituksen mukaisesti ja voidaan tutkia jo olemassa olevien tuotteiden kestävyyttä eli niin sanotusti vanhentaa niitä testien avulla, jolloin saadaan selville tuotteen teoreettinen elinikä.

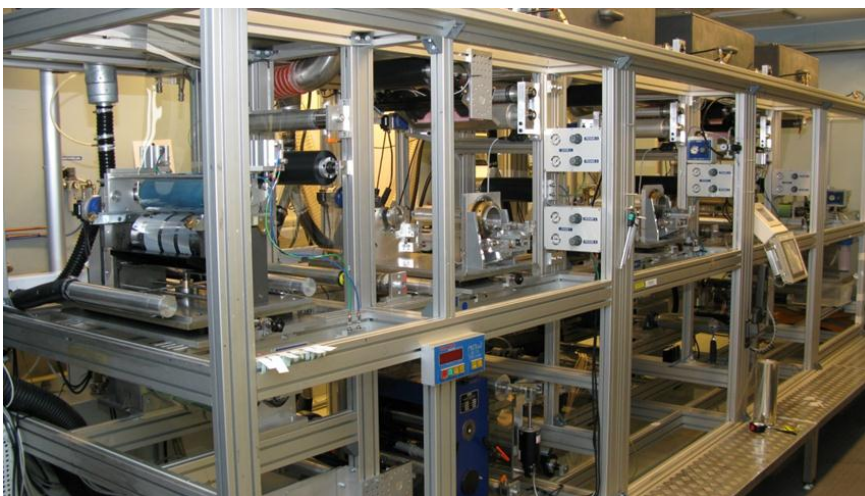
Koska tässä työssä on kyse taipuisalle materiaalille painetusta elektroniikasta, on syytä ottaa huomioon myös taivuttamisen vaikutus komponentteihin. Taivutuksen vaikutuksen tutkimiseen on olemassa erilaisia taivutuslaitteita, ns. testipenkkejä, joilla on mahdollista testata hallitusti taivutuksen vaikutusta komponentin parametreihin. Testeillä on mahdollista tutkia ainakin nopean tai hetkellisen taivutuksen vaikutusta sekä pitkäkestoisemmilla testeillä jatkuvan taivutuksen vaikutusta komponentin parametreihin ja rakenteen kestävyys.

6 TESTIKOMPONENTTIEN PAINOPROSESSI

Tässä luvussa perehdytään tähän työhön liittyvien komponenttien painotapah-
tumaan, käytettyihin materiaaleihin, tekniikoihin ja parametreihin. Työn tilaaja
valitsi materiaalit ja menetelmät käyttötarkoitukseen parhaiten sopiviksi, mutta
tekijöillä oli mahdollisuus antaa mielipiteitä ja ehdotuksia valinnoiksi. Vastuksia
painettaessa vastusarvojen säätäminen tapahtui pääasiassa kahden eri mus-
teen sekoitussuhdetta vaihtelemalla, joten tässä tapauksessa esitin mielipiteen
sopivasta suhteesta, jotta päästäisiin haluttuihin resistanssiarvoihin.

6.1 Käytetty tekniikka

Tätä työtä varten painetut komponentit painettiin VTT:n ROKO-
rotaatiopainokoneella. ROKO-painokone koostuu neljästä painoyksikköpaikas-
ta, neljästä ilmatoimisesta kuivaimesta eli uunista, kahdesta UV-kuivaimesta
(ilma- ja vesijäähdytteinen) sekä telastosta. Tarvittavat kuivaimet valitaan käy-
tettävien materiaalien mukaan. ROKO-painokoneessa on mahdollista käyttää
sen neljässä eri painoyksikköpaikassa halutun painotekniikan painoyksiköitä,
joko yksi tai useampi kerrallaan. Mahdolliset tekniikat ovat forward gravure-,
reverse gravure-, rotary silk screen- ja fleksopainoyksiköt. Painettavaan älyk-
kyyteen käytettävien painovärien kuivausaikojen vuoksi on kuitenkin käytännös-
sä mahdollista painaa maksimissaan vain kahdella yksiköllä kerrallaan kuivaus-
kapasiteetin maksimoimiseksi. ROKO-painokone on esitelty kuvassa 22.



KUVA 22. VTT:n ROKO-painokone

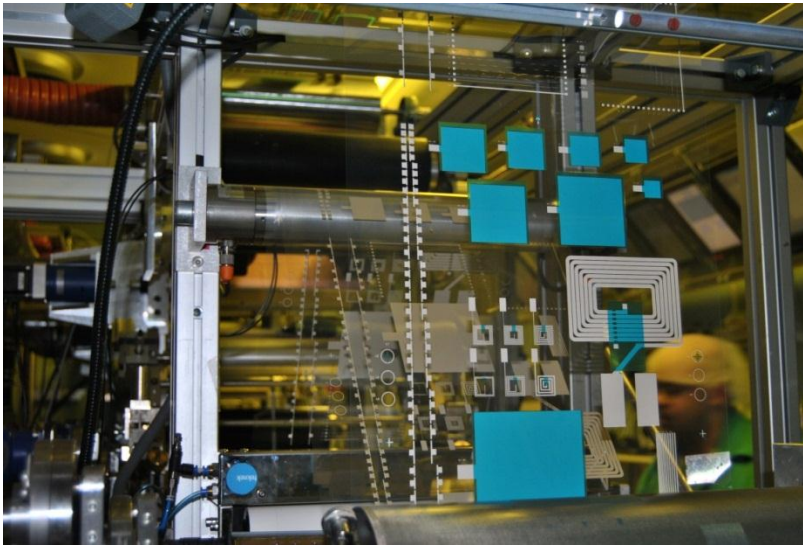
Tässä työssä käytettiin rotary silk screen- eli rullasilkkipainoyksikköä, koska kaikki valitut musteet olivat silkkipainomusteita. Tämän lisäksi silkkipainotekniikka mahdollistaa paksummat painokerrokset, jolloin saadaan aikaan pienempi resistanssi johtimille, sekä todennäköisemmin reiättömät eristealueet. Jotta kaikki komponenttien (vastus, kondensaattori, kela ja johdin) vaatimat rakenteet saatiin painettua, tarvitsi kalvolle painaa yhteensä neljä kerrosta. Kerroksista kaksi ajettiin johtavalla hopeamusteella, yksi kerros eristävällä musteella ja yksi kerros vastusmusteella. Kaikki kerrokset painettiin nopeudella 2 m/s.

Ensimmäisellä kierroksella painettiin johtavalla musteella vastusten kontaktipinnat eli padit, kondensaattorien ja kelojen alin kerros sekä johtimet. Painomateriaali kulki R-2-R-tekniikan periaatteiden mukaisesti koneen läpi. Telaston alussa oli sähköisyyttä poistava antistaattinen osa ja kalvon etenemistä (suoruutta) tarkkaileva radanohjain, joiden avulla mahdollistettiin kalvon ajaminen suorana painoyksikköön sekä helpotettiin kalvon rullaamista linjaston lopussa. Seuraavana materiaali kulki telastoa pitkin painoyksikköön, jossa halutut ensimmäisen kerroksen rakenteet painettiin materiaalille. Tämän jälkeen materiaali kulki kaikkien neljän uunin läpi kuivauskapasiteetin maksimoimiseksi. Ensimmäisen kerroksen ajon ajaksi kuivaimien lämpötila oli asetettu 130 °C:een. Kuivaimien jälkeen materiaali ajettiin kuten alussa radanohjaimen lävitse, jotta se saataisiin rullattua suoralle rullalle linjaston loppuun. Ensimmäisen kerroksen jälkeen komponentit olivat kuvan 23 mukaisia.



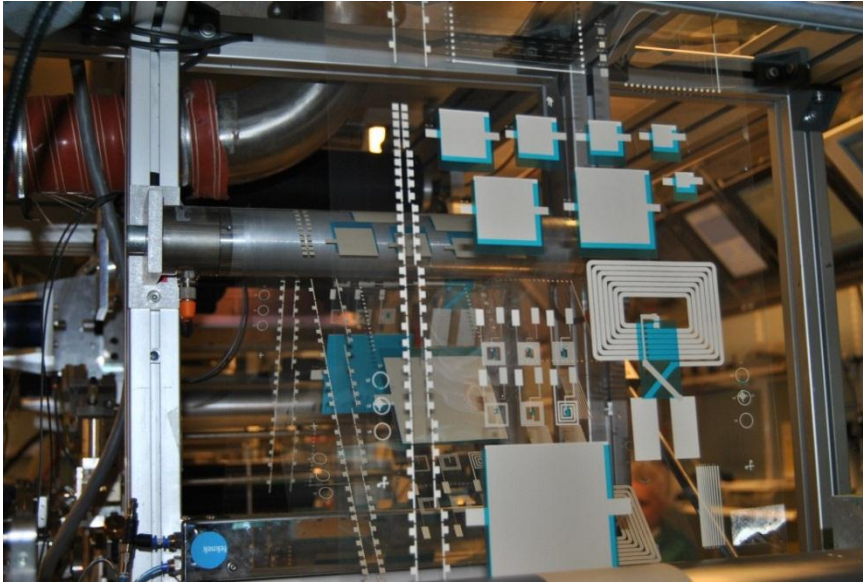
KUVA 23. Painetut komponentit ensimmäisen painokerroksen jälkeen

Ennen toisen kerroksen painamista oli rulla rullattava alkuun, jotta seuraavakin kerros voitaisiin painaa samaan suuntaan kuin ensimmäinen. Toista kerrosta varten vaihdettiin ensimmäisen uunin tilalle ilmajäähdysteinen UV-kuivain ja muiden uunien perään lisättiin vielä vesijäähdysteinen UV-kuivain, koska käytetty eristemuste oli UV-kovetteinen. Toista kerrosta painettaessa ei uuneissa ollut lämpöä päällä, vaikka kalvo kulkikin niiden lävitse. Toisella kierroksella painettiin eristävät rakenteet keloihin ja kondensaattoreihin eristävällä musteella. Toisen kerroksen jälkeen komponentit olivat kuvan 24 mukaisia.



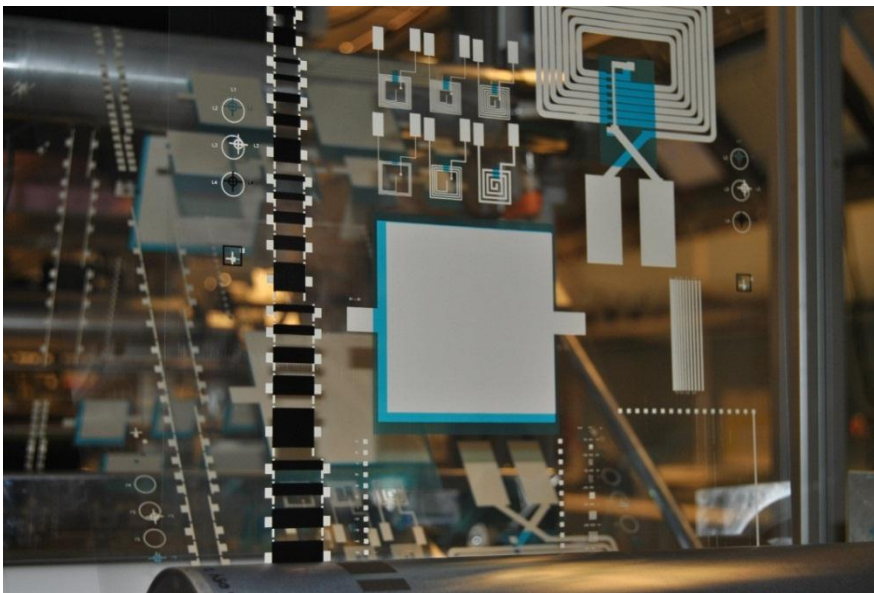
KUVA 24. Painetut komponentit toisen painokerroksen jälkeen

Ennen kolmatta kerrosta rulla rullattiin alkuun samoin kuin aikaisemminkin. UV-kuivurit poistettiin ja käytettiin taas neljää uunia, joiden lämpötila oli 130 °C, kuten ensimmäisen kerroksen yhteydessä. Kolmannella kierroksella painettiin johtavalla musteella kelojen ja kondensaattorien toinen johtava kerros eristävän kerroksen päälle. Kolmannen kerroksen jälkeen komponentit olivat kuvan 25 mukaisia.



KUVA 25. Painetut komponentit kolmannen painokerroksen jälkeen

Ennen viimeisen kerroksen painamista oli materiaali rullattava alkuun kuten aikaisemminkin. Viimeisellä kierroksella painettiin vastuspastalla vastusrakenteet ensimmäisellä kierroksella painettujen vastuskoskettimien väliin. Viimeistä kerrosta painettaessa uunien lämpötilat nostettiin 140 °C:een, koska käytetyt vastusmusteet vaativat korkeamman kuivauslämpötilan. Neljännen kerroksen jälkeen komponentit olivat kuvan 26 mukaisia.



KUVA 26. Painetut komponentit neljännen painokerroksen jälkeen

Tätä työtä varten painettiin 180 metriä komponentteja, josta oli tarkoitus saada 150 metrin verran onnistuneita komponentteja. Koska kohdistus aiheutti ongelmia jokaisella kerroksella, saanto oli huono. Komponentteja saatiin testikäyttöön vain 32 toistopituutta, mikä teki uuden sähköisen rullalta rullalle -testauslaitteen käytön kannattamattomaksi.

6.2 Käytetyt materiaalit

Tätä työtä varten painettujen komponenttien substraattina eli painomateriaalina käytettiin 300 mm:n levyistä 125 μm :n paksuista MELINEX® ST506 -polyesteri- eli PET-kalvoa. PET-kalvo on varmasti sopivin vaihtoehto tähän tarkoitukseen johtuen sen halvasta hinnasta verrattuna muihin materiaaleihin. Materiaalien valinnassa oli otettava huomioon, että tämän työn tarkoituksena oli ottaa selvää painettujen komponenttien tämänhetkisestä tasosta eikä tuottaa komponentteja kaupallisiin tarkoituksiin. Näin ollen PET-kalvo on ominaisuuksiltaan riittävä ja hinnaltaan edullisin.

Jotta kaikki komponentit saataisiin painettua, täytyi käyttää neljää eri painoväriä. Johtavien kerrosten painamiseen käytettiin Sunchemical CRSN2442 -hopeamustetta, eristekerroksen painamiseen käytettiin UV-kovetteista Sunchemical UV600B -eristemustetta ja vastusrakenteen painamiseen käytettiin Henkel PM-404 ja 6017SS -vastusmusteita sekoitussuhteella 80 % / 20 %. Hopea- ja vastusmusteiden seassa käytettiin lisäksi Sunchemical 503-99033 -hidastinta parantamaan musteiden ominaisuuksia ja hidastamaan musteen kuivumista.

7 MITTAUKSET

Tässä luvussa käsitellään painettujen vastusten ominaisuuksien määrittelyä varten suoritettuja mittauksia ja mittauksista saatuja tuloksia. Ensimmäisenä perehdytään vastusten resistanssiarvojen mittauksiin ennen ja jälkeen kalanteroinnin ja niistä saatuihin toleranssiarvoihin. Näiden jälkeen keskitytään vastusten tehonkestoon ja lämpötilan muuttumiseen käytössä. Viimeisenä tutkitaan toimintaolosuhteiden vaikutusta komponenttien ominaisuuksiin.

7.1 Resistanssiarvojen mittaus ennen kalanterointia

Ensimmäisenä suoritettiin resistanssiarvojen mittaus kaikille näytteenä olleille vastuksille. Komponentteja saatiin mittauksia varten 32 toistopituutta, jotka numeroitiin uusinta- ja tarkistusmittausten helpottamista varten. Resistanssiarvojen mittaus suoritettiin mittaamalla resistanssit FLUKE 179 -digitaalisella yleismittarilla. Tämän yleismittarin tarkkuus resistanssimittauksissa on $\pm 0,9 \% + 1$. Vastukset mitattiin yksitellen toistopituus kerrallaan ja tulokset kirjattiin ylös Excel-taulukkolaskentaohjelmaan jatkotoimenpiteitä varten. (15)

Mittaustuloksista tutkittiin ensimmäisenä jokaisen vastuksien kokoluokan minimi- ja maksimiarvot. Näiden jälkeen laskettiin Excel-ohjelmalla kaikkien vastusten resistanssiarvojen keskiarvot kaavan 7 mukaisesti. Keskiarvojen selvittyä laskettiin kaavojen 8 ja 9 mukaisesti resistanssiarvojen minimi- ja maksimiprosentit eli toleranssit, jotta nähtäisiin, millaisten rajojen sisällä komponentit ovat. Edellä mainitut laskennalliset tulokset löytyvät taulukosta 1. Taulukosta käy edellä mainittujen arvojen lisäksi ilmi se, kuinka monta toimivaa komponenttia on löytynyt kutakin kokoluokkaa. Taulukossa ylimpänä on fyysiseltä kooltaan pienin vastus ja alimpana suurin.

TAULUKKO 1. Painettujen vastusten resistanssiarvojen minimi- ja maksimiarvot ja -prosentit sekä keskiarvot

Vastusarvot/M Ω	Määrä	Min.	Max.	Avg.	Min%	Max%
1 (pienin vastus)	26	1,128	1,980	1,605	29,73	23,35
2	26	0,911	1,664	1,269	28,24	31,08
3	27	0,547	0,967	0,764	28,41	26,56
4	27	0,416	0,731	0,587	29,14	24,51
5	27	0,217	0,353	0,285	23,83	23,91
6	27	1,232	2,171	1,655	25,56	31,18
7	27	0,904	1,619	1,225	26,21	32,16
8	27	0,572	0,922	0,747	23,45	23,40
9	27	0,452	0,779	0,599	24,53	30,07
10	27	0,220	0,343	0,280	21,55	22,31
11	27	1,304	2,289	1,736	24,91	31,82
12	27	0,862	1,539	1,229	29,85	25,25
13	27	0,627	0,999	0,796	21,19	25,57
14	27	0,468	0,841	0,663	29,43	26,82
15	27	0,227	0,411	0,323	29,68	27,32
16	27	1,266	2,145	1,712	26,04	25,31
17	27	0,937	1,744	1,241	24,48	40,56
18	27	0,587	1,087	0,815	27,98	33,36
19	27	0,469	0,912	0,668	29,76	36,59
20	28	0,218	0,404	0,310	29,62	30,43
21	29	1,000	2,425	1,675	40,28	44,81
22	29	0,759	1,625	1,187	36,06	36,90
23	29	0,472	1,029	0,782	39,60	31,67
24	29	0,383	0,768	0,564	32,05	36,25
25	29	0,201	0,383	0,284	29,19	34,92
26	29	0,763	2,085	1,434	46,78	45,42
27	29	0,672	1,731	1,149	41,49	50,71
28	29	0,473	1,008	0,694	31,89	45,14
29	30	0,412	0,786	0,549	24,94	43,20
30	30	0,200	0,370	0,272	26,38	36,20
31	31	0,900	1,920	1,394	35,42	37,78
32	31	0,783	1,488	1,115	29,79	33,43
33	31	0,505	0,911	0,694	27,27	31,19
34	31	0,387	0,749	0,559	30,76	34,01
35	31	0,192	0,361	0,267	28,10	35,19
36	31	0,882	2,119	1,354	34,86	56,50
37	31	0,694	1,466	1,041	33,34	40,82
38	31	0,448	0,870	0,643	30,32	35,32
39	31	0,311	0,666	0,489	36,39	36,21
40 (suurin vastus)	31	0,159	0,316	0,234	32,17	34,80

Haluttiin myös selvittää vastusten periaatteelliset resistanssiarvot laskennallisesti, jotta olisi mahdollista vertailla laskennallisesti saatuja arvoja mitattuihin arvoihin. Laskennallisten arvojen laskemiseen hyödynnettiin kaavoja 4 ja 5, siten, että kaavan 5 avulla selvitettiin musteen resistiivisyysarvo ja kaavalla 4 selvitettiin lopullinen resistanssiarvo. Jotta materiaalin resistiivisyys voitaisiin laskea, tarvittiin materiaalille ominaisen neliöresistanssi, joten käytettiin hyödyksi datalehdistä löytynyttä neliöresistanssin arvoa $35000 \Omega/\square$, joka on määritelty $25 \mu\text{m}$:n kerrospaksuudelle. Lisäksi tarvittiin vastuspastan kerrospaksuus jona käytettiin kolmen mitatun kerrospaksuuden keskiarvoa $3344,74 \text{ nm}$. Kun resistiivisyys oli selvillä, voitiin selvittää vastusten laskennalliset resistanssiarvot. Saadut tulokset löytyvät taulukosta 2. Tuloksista on todettava, että ne ovat mitatuista arvoista keskimäärin $15,8 \%$ eli ne ovat noin 6,5 kertaa liian pieniä. Tähän selityksenä mahdollinen väärä kerrospaksuuden arvo, väärä neliöresistanssin arvo tai musteen viallisuus.

TAULUKKO 2. Mitatut ja lasketut resistanssiarvot

Pituus/mm	Leveys/mm	Mitattu R/M Ω KA	Laskettu R/M Ω	Poikkeama/%
4	0,4	1,605	0,350	21,8
4	0,5	1,269	0,280	22,1
4	0,8	0,764	0,175	22,9
4	1	0,587	0,140	23,8
4	2	0,285	0,070	24,6
6	0,8	1,655	0,263	15,9
6	1	1,225	0,210	17,1
6	1,6	0,747	0,131	17,6
6	2	0,599	0,105	17,5
6	4	0,280	0,053	18,7
8	1,2	1,736	0,233	13,4
8	1,5	1,229	0,187	15,2
8	2,4	0,796	0,117	14,7
8	3	0,663	0,093	14,1
8	6	0,323	0,047	14,5
10	1,6	1,712	0,219	12,8
10	2	1,241	0,175	14,1
10	3,2	0,815	0,109	13,4
10	4	0,668	0,088	13,1
10	8	0,310	0,044	14,1
12	2	1,675	0,210	12,5
12	2,5	1,187	0,168	14,2
12	4	0,782	0,105	13,4
12	5	0,564	0,084	14,9
12	10	0,284	0,042	14,8
14	2,4	1,434	0,204	14,2
14	3	1,149	0,163	14,2
14	4,8	0,694	0,102	14,7
14	6	0,549	0,082	14,9
14	12	0,272	0,041	15,0
18	3,2	1,394	0,197	14,1
18	4	1,115	0,158	14,1
18	6,4	0,694	0,098	14,2
18	8	0,559	0,079	14,1
18	16	0,267	0,039	14,7
22	4	1,354	0,193	14,2
22	5	1,041	0,154	14,8
22	8	0,643	0,096	15,0
22	10	0,489	0,077	15,7
22	20	0,234	0,039	16,4

7.2 Resistanssiarvojen mittaus kalanteroinnin jälkeen

Kun painettujen vastusten resistanssiarvot oli mitattu ensimmäisen kerran, suoritettiin komponenteille vielä kalanterointi. Kalanterointi on painoprosessissa yleisesti käytettävä jälkikäsittelyvaihe, jonka tarkoituksena on parantaa painoprosessissa käytetyn pintamateriaalin ominaisuuksia. Kalanteroinnissa kalvo ajetaan yhden tai useamman telan muodostaman nipin välitse, jossa kalvoon kohdistuu painetta ja lämpöä.

Koska haluttiin tutkia, kuinka kalanterointi vaikuttaa komponenttien ominaisuuksiin, mitattiin vastuksista resistanssiarvot kuten aikaisemmin. Tämän jälkeen laskettiin Excel-ohjelman avulla vastusten resistanssien keskiarvot, minimi- ja maksimiarvot sekä minimi- ja maksimiprosentit eli toleranssit. Saadut tulokset löytyvät taulukosta 3, josta käy myös ilmi mittaukseen käytettyjen komponenttien määrä.

Kalanteroitamattomien ja kalanteroitujen vastusten resistanssiarvoja verrattiin toisiinsa, jotta saataisiin selville kalanteroinnin vaikutus komponenttien ominaisuuksiin. Taulukossa 4 on taulukon 3 pohjalle merkitty kalanteroinnin yhteydessä nousseet arvot punaisella ja laskeneet arvot vihreällä. Taulukon perusteella voidaan päätellä, että resistanssien minimiarvot ovat pääsääntöisesti nousseet ja maksimiarvot laskeneet, joten resistanssiarvojen muutosten perusteella kalanteroinnin voidaan katsoa tasoittavan vastusten resistansseja. Sama on nähtävissä tarkastellessa minimi- ja maksimiprosentteja, jotka ovat myös pääsääntöisesti laskeneet. Toisaalta katsottaessa resistanssien keskiarvoja huomataan niidenkin laskeneen, joten voidaan todeta kalanteroinnin tasoittavan komponenttien eroja, mutta laskevan resistanssiarvoja.

TAULUKKO 3. Painettujen vastusten resistanssiarvojen minimi- ja maksimiarvot ja -prosentit sekä keskiarvot kalanteroinnin jälkeen

Vastusarvot/M Ω	Määrä	Min.	Max.	Avg.	Min%	Max%
1 (Pienin vastus)	25	1,137	1,827	1,483	23,36	23,16
2	26	0,906	1,653	1,207	24,96	36,91
3	27	0,548	0,964	0,729	24,80	32,28
4	27	0,421	0,699	0,567	25,80	23,19
5	27	0,197	0,350	0,275	28,36	27,27
6	27	1,125	2,110	1,572	28,44	34,22
7	27	0,885	1,626	1,171	24,43	38,84
8	27	0,561	0,895	0,714	21,45	25,31
9	27	0,444	0,730	0,577	23,11	26,41
10	27	0,221	0,341	0,275	19,61	24,03
11	27	1,292	2,122	1,653	21,85	28,35
12	27	0,856	1,550	1,182	27,58	31,13
13	27	0,606	0,976	0,772	21,46	26,49
14	27	0,468	0,823	0,649	27,88	26,82
15	27	0,232	0,400	0,317	26,71	26,36
16	27	1,220	2,144	1,643	25,75	30,48
17	27	0,929	1,764	1,215	23,51	45,24
18	27	0,581	1,105	0,798	27,20	38,45
19	27	0,454	0,880	0,654	30,60	34,53
20	28	0,221	0,415	0,306	27,82	35,54
21	29	1,003	2,244	1,626	38,30	38,03
22	29	0,762	1,632	1,158	34,17	40,99
23	29	0,479	1,020	0,768	37,60	32,88
24	29	0,393	0,754	0,555	29,18	35,86
25	29	0,202	0,372	0,282	28,39	31,88
26	29	0,789	2,229	1,453	45,71	53,38
27	29	0,689	1,672	1,141	39,59	46,60
28	29	0,483	0,991	0,698	30,82	41,95
29	30	0,418	0,770	0,551	24,14	39,75
30	30	0,202	0,365	0,273	26,06	33,60
31	31	0,912	1,870	1,389	34,34	34,62
32	31	0,806	1,458	1,126	28,39	29,53
33	31	0,521	0,901	0,696	25,19	29,37
34	31	0,391	0,742	0,561	30,26	32,34
35	31	0,195	0,357	0,268	27,11	33,45
36	30	0,893	2,074	1,331	32,88	55,88
37	31	0,699	1,455	1,027	31,92	41,72
38	31	0,455	0,854	0,637	28,60	34,01
39	31	0,316	0,655	0,487	35,15	34,42
40 (Suurin vastus)	29	0,166	0,319	0,235	29,48	35,53

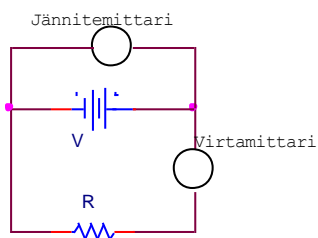
TAULUKKO 4. Resistanssiarvojen muutoksen kalanteroinnin aikana, nousseet arvot nähtävissä punaisella ja laskeneet vihreällä

Vastusarvot/MΩ	Määrä	Min.	Max.	Avg.	Min%	Max%	Muutos%
1 (pienin vastus)	25	1,137	1,827	1,483	23,36	23,16	-7,6
2	26	0,906	1,653	1,207	24,96	36,91	-4,9
3	27	0,548	0,964	0,729	24,80	32,28	-4,6
4	27	0,421	0,699	0,567	25,80	23,19	-3,4
5	27	0,197	0,350	0,275	28,36	27,27	-3,5
6	27	1,125	2,110	1,572	28,44	34,22	-5,0
7	27	0,885	1,626	1,171	24,43	38,84	-4,4
8	27	0,561	0,895	0,714	21,45	25,31	-4,4
9	27	0,444	0,730	0,577	23,11	26,41	-3,6
10	27	0,221	0,341	0,275	19,61	24,03	-2,0
11	27	1,292	2,122	1,653	21,85	28,35	-4,8
12	27	0,856	1,550	1,182	27,58	31,13	-3,8
13	27	0,606	0,976	0,772	21,46	26,49	-3,0
14	27	0,468	0,823	0,649	27,88	26,82	-2,1
15	27	0,232	0,400	0,317	26,71	26,36	-1,9
16	27	1,220	2,144	1,643	25,75	30,48	-4,0
17	27	0,929	1,764	1,215	23,51	45,24	-2,1
18	27	0,581	1,105	0,798	27,20	38,45	-2,1
19	27	0,454	0,880	0,654	30,60	34,53	-2,0
20	28	0,221	0,415	0,306	27,82	35,54	-1,2
21	29	1,003	2,244	1,626	38,30	38,03	-2,9
22	29	0,762	1,632	1,158	34,17	40,99	-2,5
23	29	0,479	1,020	0,768	37,60	32,88	-1,8
24	29	0,393	0,754	0,555	29,18	35,86	-1,5
25	29	0,202	0,372	0,282	28,39	31,88	-0,6
26	29	0,789	2,229	1,453	45,71	53,38	1,4
27	29	0,689	1,672	1,141	39,59	46,60	-0,7
28	29	0,483	0,991	0,698	30,82	41,95	0,5
29	30	0,418	0,770	0,551	24,14	39,75	0,4
30	30	0,202	0,365	0,273	26,06	33,60	0,6
31	31	0,912	1,870	1,389	34,34	34,62	-0,3
32	31	0,806	1,458	1,126	28,39	29,53	0,9
33	31	0,521	0,901	0,696	25,19	29,37	0,3
34	31	0,391	0,742	0,561	30,26	32,34	0,3
35	31	0,195	0,357	0,268	27,11	33,45	0,2
36	30	0,893	2,074	1,331	32,88	55,88	-1,7
37	31	0,699	1,455	1,027	31,92	41,72	-1,4
38	31	0,455	0,854	0,637	28,60	34,01	-0,9
39	31	0,316	0,655	0,487	35,15	34,42	-0,3
40 (suurin vastus)	29	0,166	0,319	0,235	29,48	35,53	0,4

7.3 Tehonkeston ja lämpötilan muutoksen mittaus

Usein vastuksen tehonkestoä mitataan selvittämällä, mikä on suurin teho, jolla resistanssiarvot pysyvät annetuissa toleransseissa. Tätä työtä varten painetut vastuskomponentit olivat resistanssiarvoiltaan niin suuria, että niihin oli mahdollonta saada aikaiseksi tavallisilla jännitelähteillä riittävän suuria virtoja tavallisten vastuskomponenttien tehonkestoarvojen saavuttamiseen. Tämän vuoksi tehonkeston mittaukset suoritettiin käyttämällä kolmea erikokoista vastusta ja syöttämällä niihin neljää erisuuruista jännitettä tunnin ajan ja samalla seurattiin komponentin pintalämpötilan muutoksia.

Mittauskytkentään syötettiin jännitettä Mascot 719 -jännitelähteellä. Mittauksen aikana komponentin läpi kulkevaa virtaa mitattiin Hewlett-Packard 34401A -digitaalisella yleismittarilla ja piiriin syötettävää jännitettä tarkkailtiin FLUKE 179 -yleismittarilla. Komponentin pintalämpötilaa tarkkailtiin FLUKE 179 -yleismittariin kytketyllä lämpötila-anturilla, joka oli asetettu koskettamaan komponentin pintaa. Lisäksi ympäristön lämpötilaan ja ilmankosteutta mittauksen aikana tarkkailtiin FLUKE 971 -lämpö- ja kosteusmittarilla. Mittauksessa käytetty mittauskytkentä oli kuvan 27 mukainen.



KUVA 27. Tehonkeston ja lämpötilan muutoksen mittaamiseen käytetty mittauskytkentä

Mittauksen aikana kytkentään syötettiin neljää eri jännitettä (5, 12, 24 ja 30 V) tunnin ajan kutakin, mistä mitattiin virran suuruus ja tarkkailtiin komponentin pintalämpötilaa käytön aikana. Mittauksista saatiin tuloksina vastuksen läpi kulkeva virta, sen yli vaikuttava jännite sekä pintalämpötilan arvot. Saaduista jännitteen ja virran arvoista laskettiin kaavan 2 mukaisesti vastuksen tehohäviö. Lisäksi komponentille laskettiin kaavan 1 mukaisesti laskennallinen virran arvo.

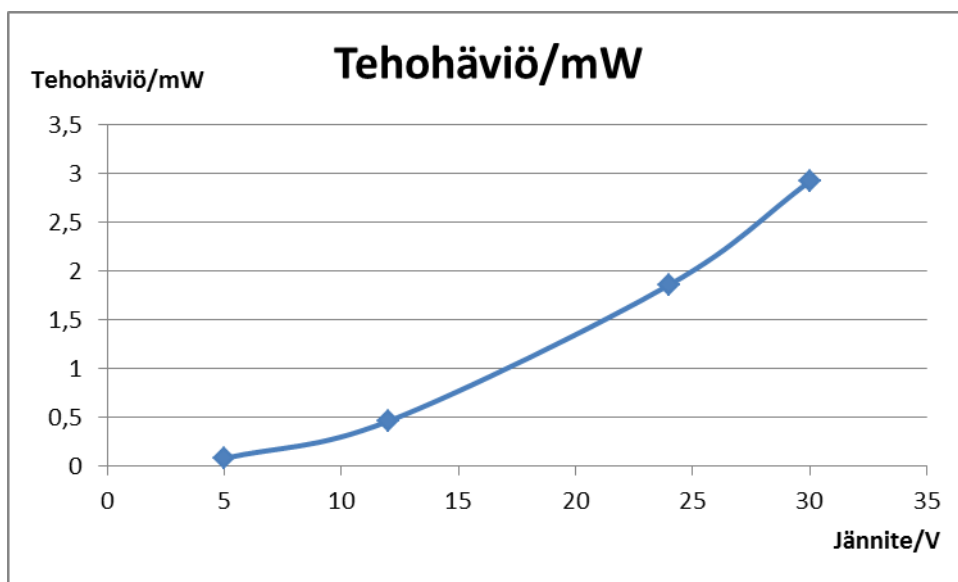
Ensimmäisenä mitattiin 296 k Ω :n suuruista vastusta. Mittauksesta saadut tulokset löytyvät taulukosta 5, virran laskennallinen arvo taulukosta 6 ja kuvasta 28 näkyy vastuksen tehohäviö milliwatteina jännitteen arvoilla 5, 12, 24 ja 30 V.

TAULUKKO 5. 296 k Ω :n suuruisen vastuksen virta ja tehohäviö 5, 12, 24, ja 30 V:n jännitteillä

Vastus 296 k Ω		
Jännite/V	Virta/mA	Tehohäviö/mW
5	0,016	0,08
12	0,0385	0,462
24	0,0775	1,86
30	0,0974	2,922

TAULUKKO 6. 296 k Ω :n suuruisen vastuksen laskennallinen virta 5, 12, 24, ja 30 V:n jännitteillä

Vastus 296 k Ω	
Jännite/V	Laskennallinen virta/mA
5	0,0169
12	0,0405
24	0,0811
30	0,1014



KUVA 28. 296 k Ω :n suuruisen vastuksen tehohäviö 5, 12, 24, ja 30 V:n jännitteillä

Saman mittauksen aikana mitattiin myös komponentin pintalämpötilan muutoksia käytössä. Lisäksi tarkkailtiin myös ilman lämpötilaa ja kosteutta mittaustilassa, jotta olosuhteet pysyisivät mahdollisimman tasaisina. Mittauksesta 5 V:n jännitteellä saadut tulokset löytyvät taulukosta 7, 12 V:n jännitteellä mitatut taulukosta 8, 24 V:n jännitteellä mitatut taulukosta 9 ja 30 V:n jännitteellä mitatut taulukosta 10.

TAULUKKO 7. 296 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötilan muutos 5 V:n jännitteellä

Vastus 296 k Ω			
Ajanhetki/min	Lämpötila/°C	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25	24,7	45,5
1	25	24,7	45,7
5	25	24,8	46,5
10	25	24,8	46,6
15	25	24,9	45,8
30	25,3	25	45,8
45	25,2	25,3	44,9
60	25,4	25,3	44,6

TAULUKKO 8. 296 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötilan muutos 12 V:n jännitteellä

Vastus 296 k Ω			
Ajanhetki/min	Lämpötila/°C	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,4	25,3	44,6
1	25,4	25,3	44,5
5	25,5	25,3	44,5
10	25,4	25,3	44,5
15	25,5	25,3	44,6
30	25,4	25,4	44,1
45	25,5	25,3	44,5
60	25,4	25,4	43,9

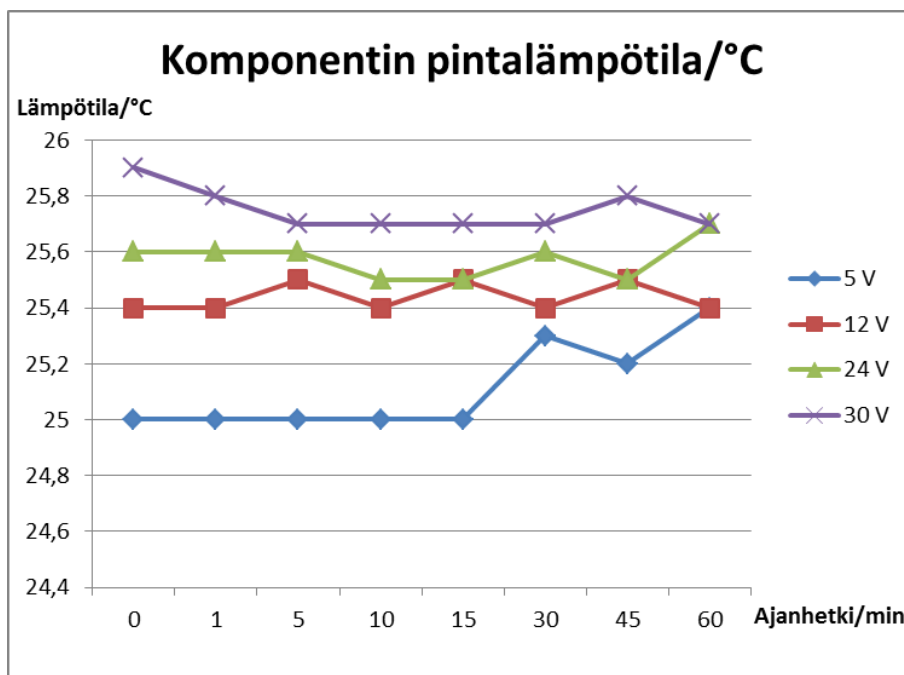
TAULUKKO 9. 296 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötilan muutos 24 V:n jännitteellä

Vastus 296 k Ω			
Ajanhetki/min	Lämpötila/°C	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,6	25,4	43,9
1	25,6	25,4	43,9
5	25,6	25,4	44,1
10	25,5	25,3	44
15	25,5	25,4	43,8
30	25,6	25,5	43,6
45	25,5	25,5	43,5
60	25,7	25,5	43,3

TAULUKKO 10. 296 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötilan muutos 30 V:n jännitteellä

Vastus 296 k Ω			
Ajanhetki/min	Lämpötila/°C	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,9	25,5	43,3
1	25,8	25,5	43,5
5	25,7	25,5	43,3
10	25,7	25,5	43,3
15	25,7	25,5	43,3
30	25,7	25,4	43,1
45	25,8	25,4	43,1
60	25,7	25,4	43,2

Taulukoiden lisäksi komponentin pintalämpötilojen arvot ovat nähtävissä kuvasta 29, jossa käyvät ilmi komponentin pintalämpötila ajanhetkillä 0–60 minuuttia jännitteiden arvoilla 5, 12, 24 ja 30 V.



KUVA 29. 296 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötila ajanhetkillä 0–60 minuuttia jännitteiden arvoilla 5, 12, 24 ja 30 V

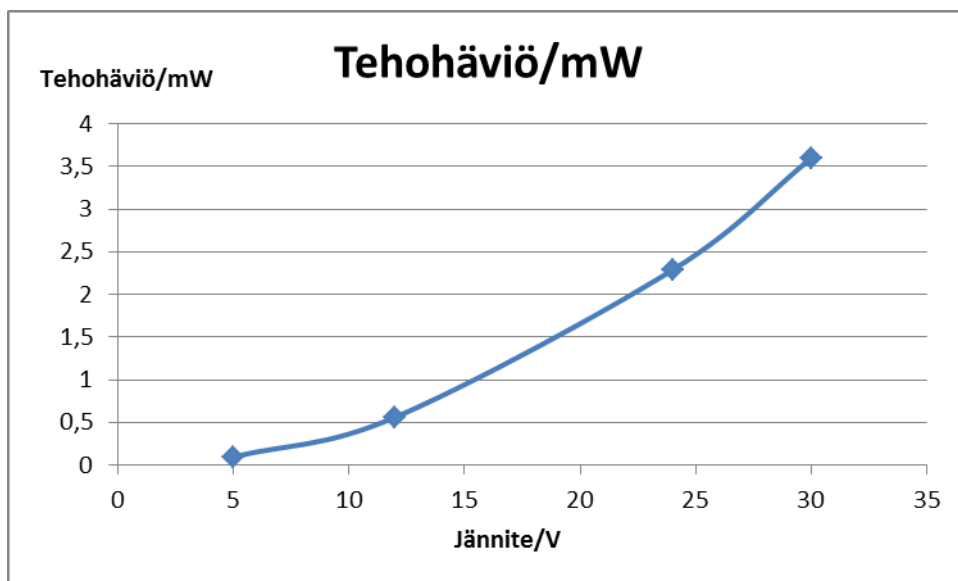
Mittaukset ja laskennalliset toimet suoritettiin toiselle 272 k Ω :n suuruiselle vastukselle samoin kuin ensimmäiselle. Tehonkeston mittauksesta saadut tulokset löytyvät taulukosta 11, laskennalliset virran arvot taulukosta 12 ja kuvassa 30 näkyy vastuksen tehohäviö milliwatteina jännitteen arvoilla 5, 12, 24 ja 30 voltia.

TAULUKKO 11. 272 k Ω :n suuruisen vastuksen virta ja tehohäviö 5, 12, 24, ja 30 V:n jännitteillä

Vastus 272 k Ω		
Jännite/V	Virta/mA	Tehohäviö/mW
5	0,0196	0,098
12	0,047	0,564
24	0,0954	2,2896
30	0,12	3,6

TAULUKKO 12. 272 k Ω :n suuruisen vastuksen laskennallinen virta 5, 12, 24, ja 30 V:n jännitteillä

Vastus 272 k Ω	
Jännite/V	Laskennallinen virta/mA
5	0,0184
12	0,0441
24	0,0882
30	0,1103



KUVA 30. 272 k Ω :n suuruisen vastuksen tehohäviö 5, 12, 24, ja 30 V:n jännitteillä

Komponentin pintalämpötilan muutosta mitattiin kuten edellä. 5 V:n jännitteellä mitatut arvot löytyvät taulukosta 13, 12 V:n jännitteellä mitatut taulukosta 14, 24 V:n jännitteellä mitatut taulukosta 15 ja 30 V:n jännitteellä mitatut taulukosta 16.

TAULUKKO 13. 272 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötilan muutos 5 V:n jännitteellä

Vastus 272 k Ω			
Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,8	24,7	36,7
1	25,4	24,7	37
5	25,5	24,6	36,5
10	26,1	24,7	36,6
15	25,2	24,7	36,7
30	25,2	24,8	36,2
45	25,6	24,9	36,6
60	25,2	24,9	36

TAULUKKO 14. 272 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötilan muutos 12 V:n jännitteellä

Vastus 272 k Ω			
Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,4	25	36,1
1	25,3	24,9	35,9
5	25,4	24,9	36
10	25,4	24,9	35,7
15	25,4	24,9	35,8
30	25,4	25	35,4
45	25,4	25,1	35,1
60	25,4	25,1	34,2

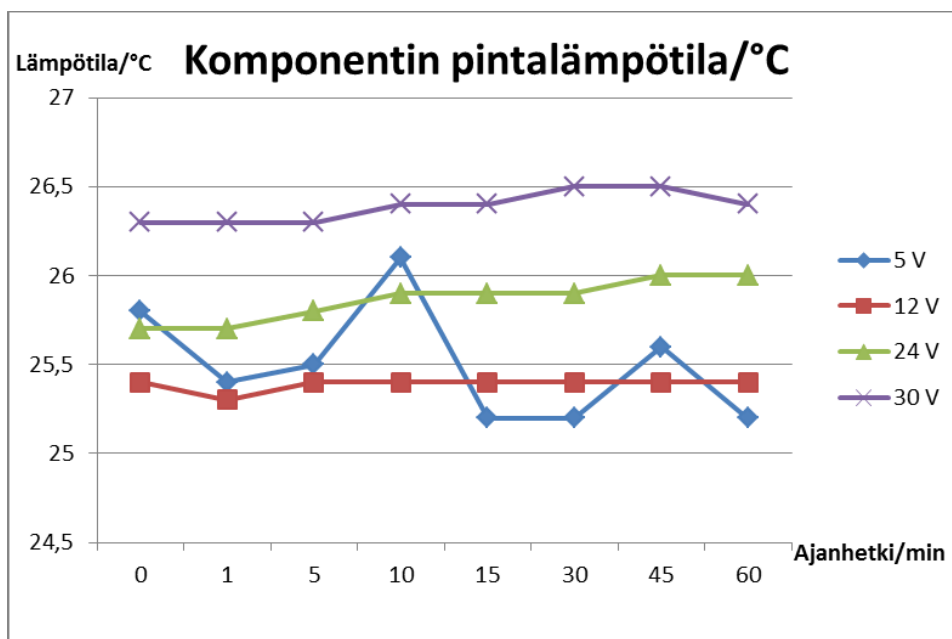
TAULUKKO 15. 272 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötilan muutos 24 V:n jännitteellä

Vastus 272 k Ω			
Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,7	25,1	34,5
1	25,7	25,1	34,2
5	25,8	25,1	34,5
10	25,9	25,2	34,4
15	25,9	25,1	34,1
30	25,9	25,1	33,9
45	26	25,2	33,5
60	26	25,2	33,2

TAULUKKO 16. 272 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötilan muutos 30 V:n jännitteellä

Vastus 272 k Ω			
Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/C°	Ilman kosteus/%
0	26,3	25,2	33
1	26,3	25,2	32,8
5	26,3	25,2	32,9
10	26,4	25,3	32,5
15	26,4	25,2	32,4
30	26,5	25,2	32,6
45	26,5	25,4	32,6
60	26,4	25,3	32,5

Taulukoiden lisäksi komponentin pintalämpötilojen arvot ovat nähtävissä kuvassa 31, jossa käyvät ilmi komponentin pintalämpötila ajanhetkillä 0–60 minuuttia jännitteiden arvoilla 5, 12, 24 ja 30 V.



KUVA 31. 272 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötila ajanhetkillä 0–60 minuuttia jännitteiden arvoilla 5, 12, 24 ja 30 V

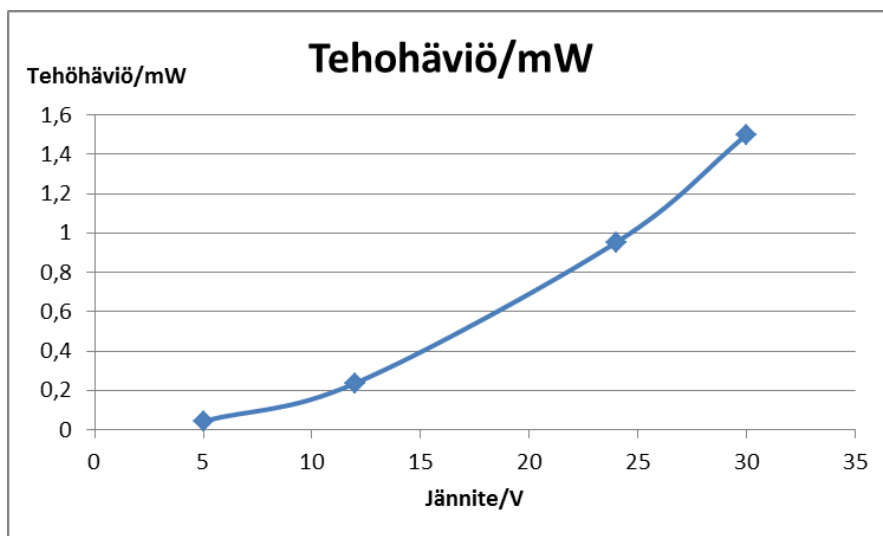
Mittaukset ja laskennalliset toimet suoritettiin kolmannelle 670 k Ω :n suuruiselle vastukselle samoin kuin kahdelle aikaisemmalle. Tehonkeston mittauksesta saadut tulokset löytyvät taulukosta 17, virran laskennalliset arvot taulukosta 18 ja kuvassa 32 näkyy vastuksen tehohäviö milliwatteina jännitteen arvoilla 5, 12, 24 ja 30 voltia.

TAULUKKO 17. 670 k Ω :n suuruisen vastuksen virta ja tehohäviö 5, 12, 24, ja 30 V:n jännitteillä

Vastus 670 k Ω		
Jännite/V	Virta/mA	Tehohäviö/mW
5	0,0089	0,0445
12	0,0198	0,2376
24	0,0397	0,9528
30	0,05	1,5

TAULUKKO 18. 670 k Ω :n suuruisen vastuksen laskennallinen virta 5, 12, 24, ja 30 V:n jännitteillä

Vastus 670 k Ω	
Jännite/V	Laskennallinen virta/mA
5	0,0075
12	0,0179
24	0,0358
30	0,0448



KUVA 32. 670 k Ω :n suuruisen vastuksen tehohäviö 5, 12, 24, ja 30 V:n jännitteillä

Komponentin pintalämpötilan muutosta mitattiin kuten aikaisempien komponenttien kohdalla. 5 V:n jännitteellä mitatut arvot löytyvät taulukosta 19, 12 V:n jännitteellä mitatut taulukosta 20, 24 V:n jännitteellä mitatut taulukosta 21 ja 30 V:n jännitteellä mitatut taulukosta 22.

TAULUKKO 19. 670 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötilan muutos 5 V:n jännitteellä

Vastus 670 k Ω			
Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,4	24,4	32,9
1	24	23,9	32,6
5	23,8	23,6	33
10	24,2	23,7	32,9
15	23,6	23,8	32,8
30	23,6	24	32,6
45	23,8	24,1	32
60	24	24,1	31,6

TAULUKKO 20. 670 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötilan muutos 12 V:n jännitteellä

Vastus 670 k Ω			
Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	23,7	24,1	31,5
1	23,9	24,1	32,1
5	23,8	24,1	31,2
10	23,7	24,2	31,1
15	24,1	24,2	31
30	24,1	24,3	30,7
45	24,3	24,3	30,1
60	23,9	24,4	30,2

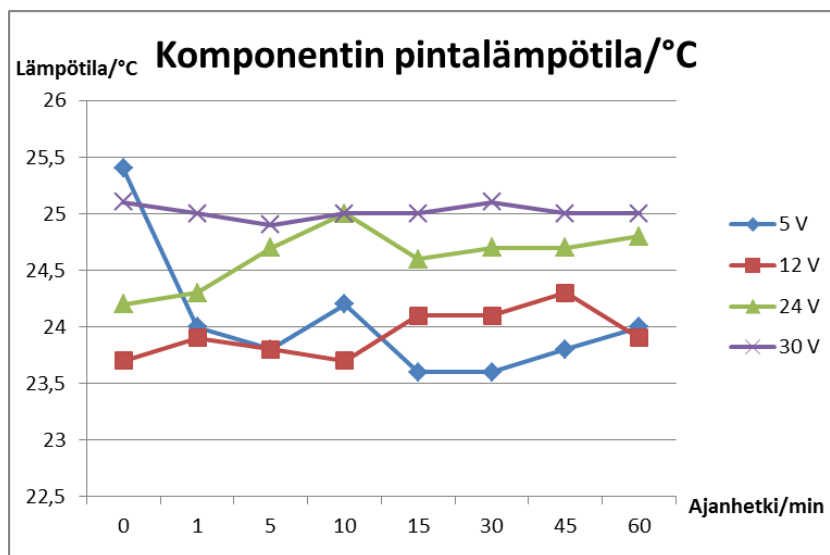
TAULUKKO 21. 670 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötilan muutos 24 V:n jännitteellä

Vastus 670 k Ω			
Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	24,2	24,4	30,01
1	24,3	24,4	30,3
5	24,7	24,4	30,3
10	25	24,4	30,5
15	24,6	24,4	30,8
30	24,7	24,3	30,9
45	24,7	24,4	30,3
60	24,8	24,5	30

TAULUKKO 22. 670 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötilan muutos 30 V:n jännitteellä

Vastus 670 k Ω			
Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/C°	Ilman kosteus/%
0	25,1	24,5	30,1
1	25	24,5	30,2
5	24,9	24,5	30
10	25	24,6	30
15	25	24,6	30,1
30	25,1	24,7	30,2
45	25	24,6	30,2
60	25	24,7	30,3

Taulukoiden lisäksi komponentin pintalämpötilojen arvot ovat nähtävissä kuvassa 33, jossa käyvät ilmi komponentin pintalämpötila ajanhetkillä 0...60 minuuttia jännitteiden arvoilla 5, 12, 24, 30 V.



KUVA 33. 670 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötila ajanhetkillä 0–60 minuuttia jännitteiden arvoilla 5, 12, 24 ja 30 V

Tehonkeston ja lämpötilan muutoksen käytössä mittauksen tuloksista on nähtävissä, että vielä on matkaa todellisiin komponenttien tehonkestoisiin, sillä tehohäviöiden arvot ovat niin pieniä ja näin ollen komponenttien pintalämpötiloissa ei tapahdu merkittäviä muutoksia. Tarvittaisiin huomattavasti suurempia jännitteitä, jotta tehohäviöt saataisiin nousemaan riittävän suuriksi tehonkeston kannalta. Lisäksi mittaus vaatisi resistanssin yhtäaikaisen mittaamisen, jolloin olisi

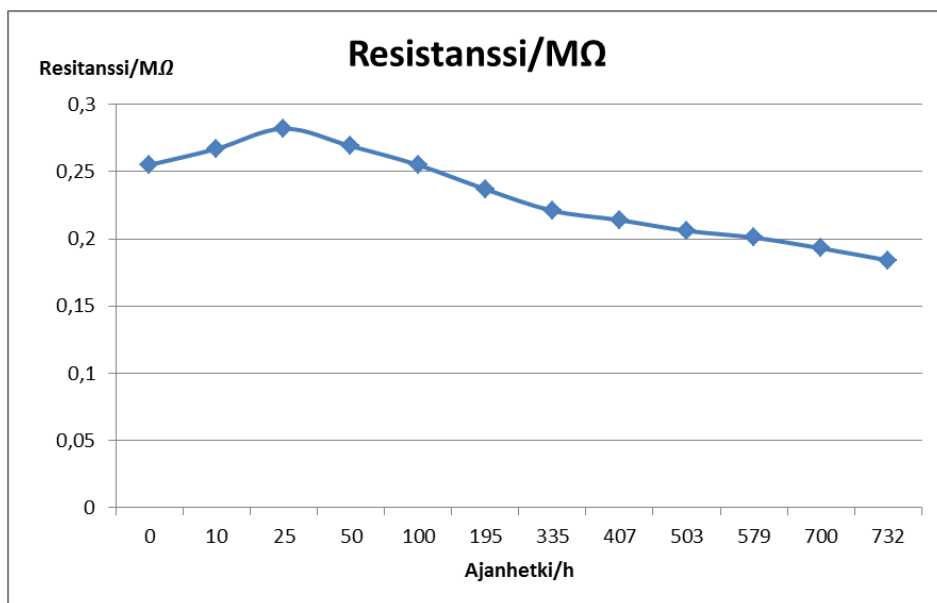
mahdollista tarkkailla resistanssiarvon pysymistä toleransseissa. Laskennallisten virtojen arvot poikkeavat mitatuista arvoista, ja tämä johtunee mittalaitteiden tarkkuudesta, niin komponenttien resistanssiarvojen kuin jännitteidenkin mitta-uksissa.

7.4 Olosuhteiden vaikutuksen mittaus

Komponenteille oli tarkoitus suorittaa standardin mukainen 1000 tunnin mittainen THB -testi, jossa lämpötila oli 85 °C ja kosteus 85 %. Valitettavasti mittaus- ta ei saatu suoritettua standardin mukaiseen tuhanteen tuntiin saakka, koska jostain syystä kone oli pysähtynyt 732 tunnin kohdalle. Mittaus suoritettiin Es- pec SH-240 -lämpötila- ja kosteuskaapissa Oulun seudun ammattikorkeakoulun tiloissa. Mittauksen aikana seurattiin kahden painetun vastuskomponentin resis- tanssiarvojen muutoksia aluksi tiheämmin ja myöhemmin noin 100 tunnin vä- lein. Mittausta ei ollut mahdollista suorittaa tarkoin väliajoin johtuen koulun au- kioloajoista. Mittauksesta saadut tulokset löytyvät taulukosta 23 ja 24, joista on nähtävissä vastusten resistanssiarvot eri ajanhetkillä mittauksen aikana ja ha- vainnollisemmassa muodossa kuvissa 34 ja 35.

TAULUKKO 23. Painetun vastuksen resistanssiarvo olosuhdemittauksen aikana

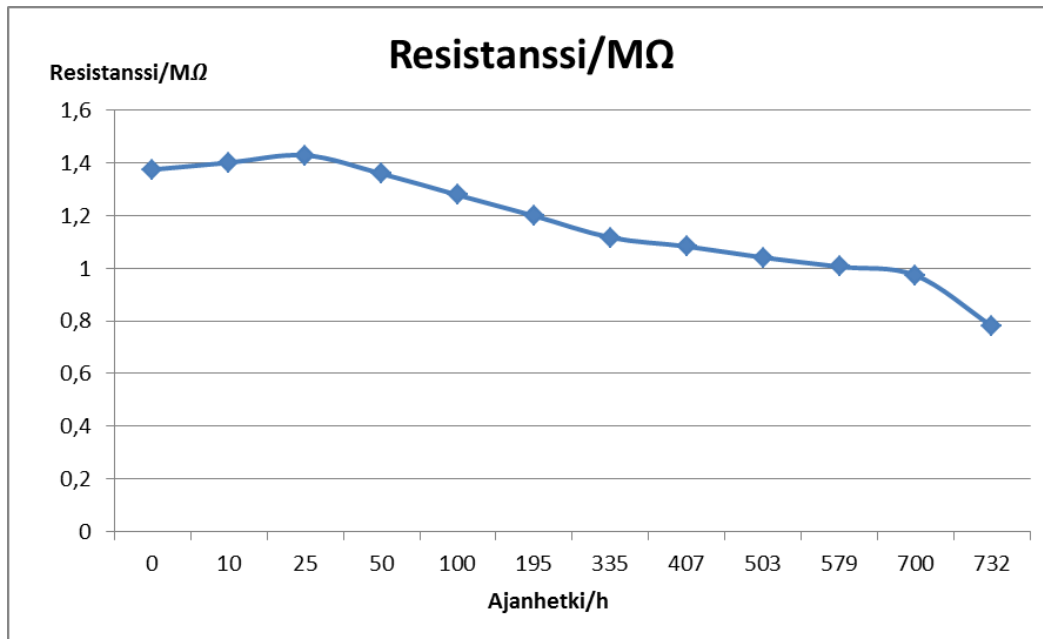
Ajanhetki/h	Resistanssi/MΩ	Muutos%
0	0,255	-27,8
10	0,267	
25	0,282	
50	0,269	
100	0,255	
195	0,237	
335	0,221	
407	0,214	
503	0,206	
579	0,201	
700	0,193	
732	0,184	



KUVA 34. Painetun vastuksen resistanssiarvo olosuhdemittauksen aikana

TAULUKKO 24. Painetun vastuksen resistanssiarvo olosuhdemittauksen aikana

Ajanhetki/h	Resistanssi/MΩ	Muutos%
0	1,375	-43,3
10	1,401	
25	1,429	
50	1,359	
100	1,278	
195	1,199	
335	1,117	
407	1,083	
503	1,041	
579	1,006	
700	0,973	
732	0,78	



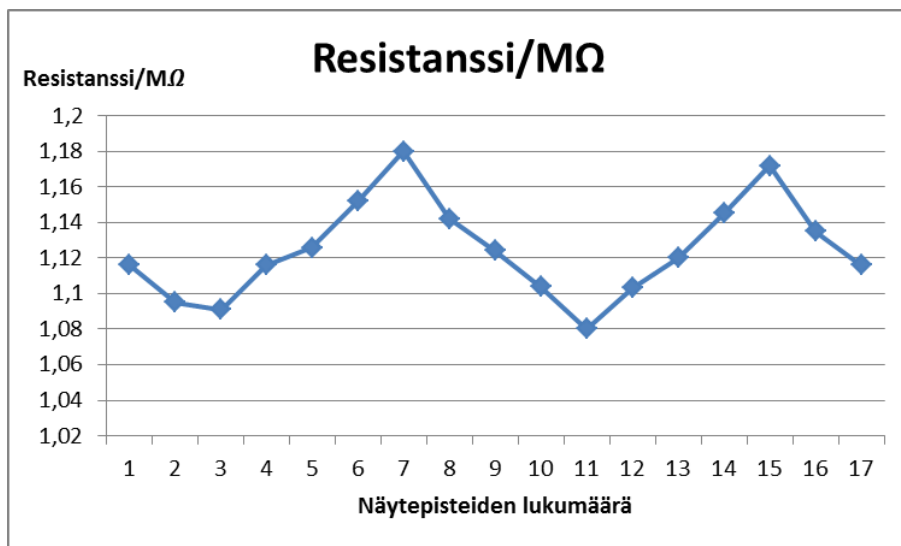
KUVA 35. Painetun vastuksen resistanssiarvo olosuhdemittauksen aikana

Komponentin ominaisuuksien muutoksia olosuhteiden vaikutuksesta tutkittiin myös toisella olosuhdetestillä. Tässä testissä vaihdeltiin lämpökaapin lämpötilaa 75 °C:n ja -25 °C:n välillä siten, että mittaus aloitettiin 25 °C:sta ja lopetettiin samaan lämpötilaan. Vastuksen resistanssiarvoja mitattiin aina 25 °C:n välein sekä lämmitettäessä että jäähdytettäessä siten, että minimi- ja maksimilämpötiloissa käytiin kaksi kertaa. Mittauksesta saadut tulokset löytyvät taulukosta 25.

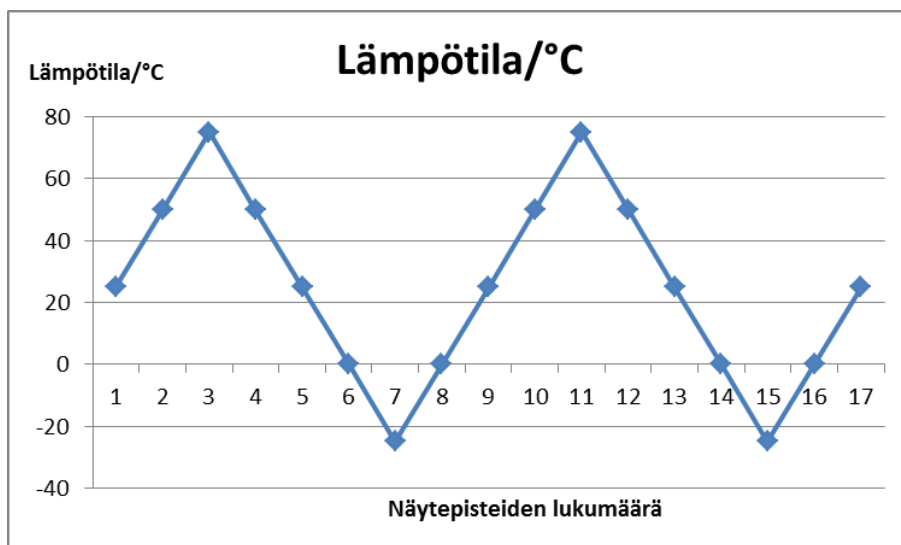
TAULUKKO 25. Vastuksen resistanssiarvot lämpösyklimitoituksen aikana

Lämpötila/°C	Resistanssi/MΩ
25	1,116
50	1,095
75	1,091
50	1,116
25	1,126
0	1,152
-25	1,18
0	1,142
25	1,124
50	1,104
75	1,08
50	1,103
25	1,12
0	1,145
-25	1,172
0	1,135
25	1,116

Kuvissa 36 ja 37 on havainnollisemmin nähtävissä resistanssiarvojen muutos lämpötilojen muuttuessa. Kuvista voidaan todeta resistanssiarvon olevan suurimmillaan matalimmassa lämpötilassa ja pienimmillään korkeimmassa lämpötilassa.



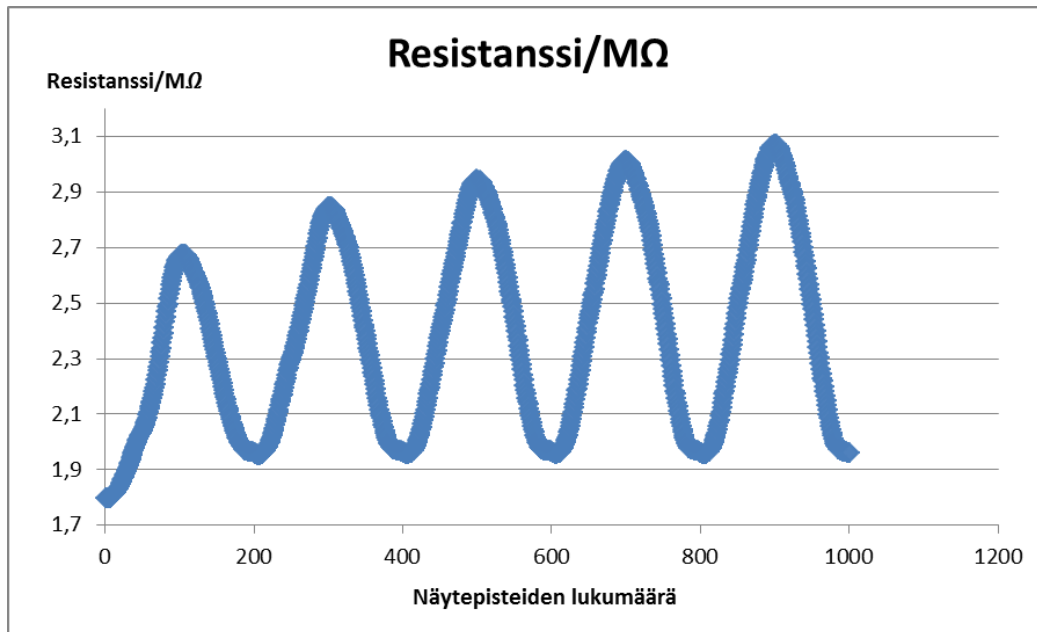
KUVA 36. Vastuksen resistanssiarvojen muutos lämpötilatestin aikana



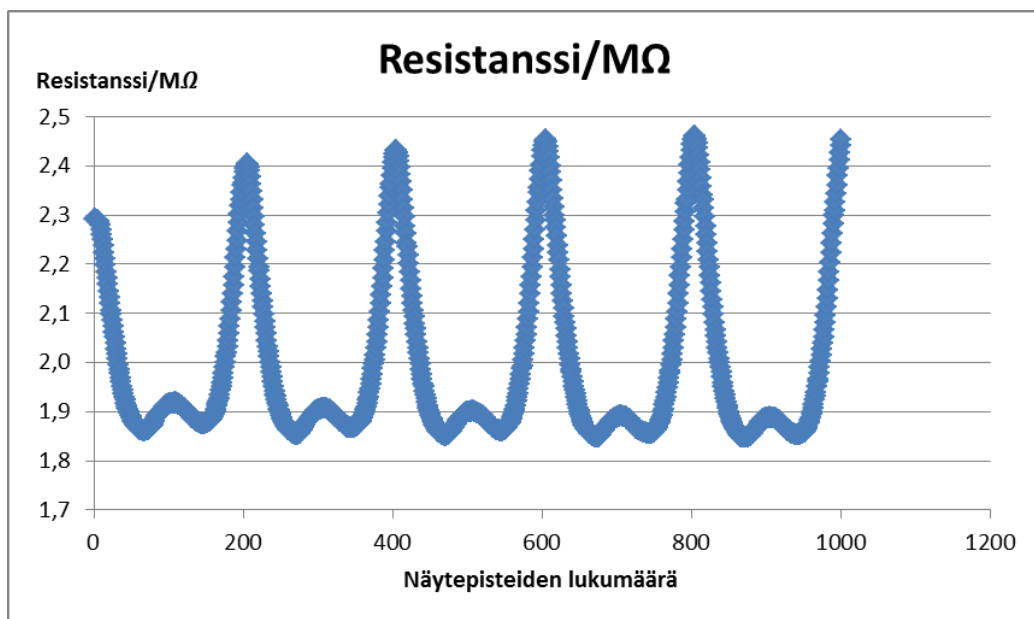
KUVA 37. Lämpötilan muutos lämpötestin aikana

Olosuhteiden vaikutusta komponenttien ominaisuuksiin tutkittiin myös taivutustesteillä. Taivutustestit suoritettiin kahdelle komponentille, joista toista taivutettiin molempiin suuntiin eli komponentti oli sekä venytyksessä että puristuksessa. Toinen komponentti oli pelkästään venytyksessä. Puristuksella tarkoitetaan sitä,

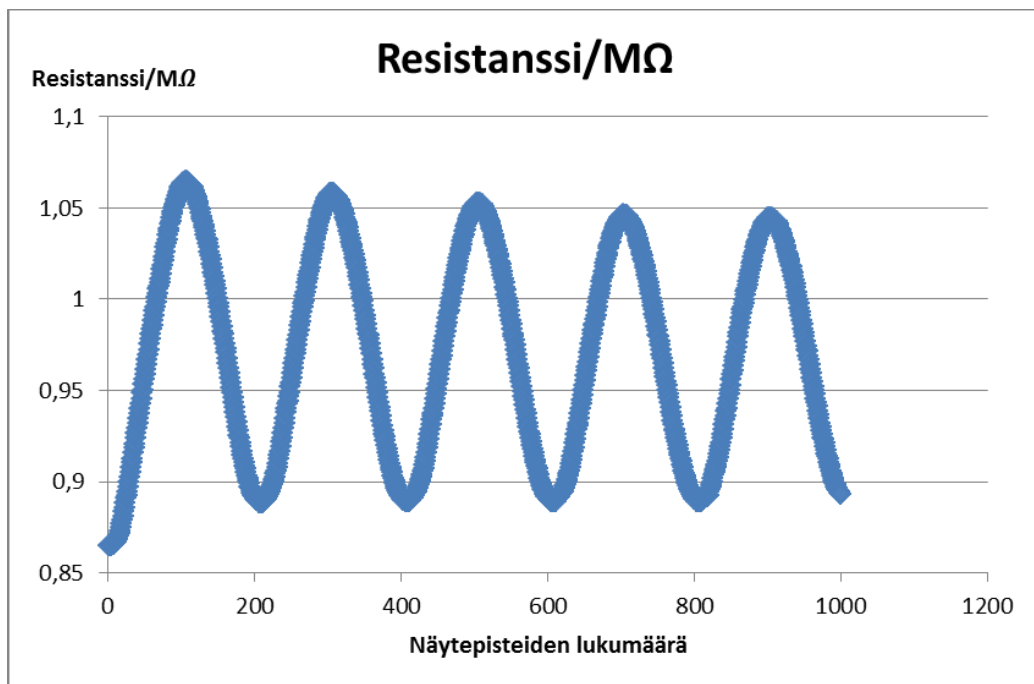
että painopinta on taivutuksessa kaaren sisäpinnalla ja venytyksessä kaaren ulkopinnalla. Mittaus suoritettiin Oulun yliopistolla tarkoitukseen sopivalla taivutuslaitteella, jossa mittaus aloitettiin komponentin ollessa suorana ja tämän jälkeen sitä taivutettiin ääriasentoon ja palattiin takaisin alkutilanteeseen. Sama sykli suoritettiin useita kertoja ja mittauksen aikana seurattiin komponentin resistanssiarvojen muutoksia. Tulokset ensimmäisen vastuksen mittauksista löytyvät kuvista 38 sekä 39 ja toisen komponentin mittauksen tulos kuvasta 40.



KUVA 38. Erään vastuksen resistanssi venytystaivutuksessa



KUVA 39. Erään vastuksen resistanssi puristustaivutuksessa



KUVA 40. Erään vastuksen resistanssi venytystaivutuksessa

8 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli tutustua painetun älykkyyden valmistusprosessien avulla valmistettujen painettujen vastusten ominaisuuksiin perehtymällä niihin teoreettisesti sekä tutkimalla niitä mittauksien avulla. Mittauksista saatujen tulosten ja materiaalivalintojen perusteella oli tarkoitus tehdä tietolomake, jonka perusteella voitaisiin vertailla eri materiaaleista tai eri tekniikoilla valmistettuja komponentteja toisiinsa.

Painettujen vastusten resistanssit mitattiin sekä ennen että jälkeen kalanteroinnin, jotta saataisiin selville kalanteroinnin vaikutus resistanssiarvoihin. Mittausten perusteella on todettavissa, että kalanterointi tasoitti resistanssiarvoja nostamalla minimiarvoja ja laskemalla maksimiarvoja ja näin ollen pienentämällä myös toleranssiarvoja, mutta laski resistanssiarvoja hieman katsottaessa resistanssien keskiarvoja. Vertaillen mitattuja ja laskennallisesti selvitettyjä resistanssiarvoja on todettava, että arvot poikkeavat toisistaan huomattavasti laskennallisten arvojen ollessa noin 6,5 kertaa pienempiä. Tämä todennäköisesti johtuu joko väärästä kerrospaksuuden arvosta, neliöresistanssista tai viallisesta musteesta. Jotta asiaan saataisiin selvyys, tulisi mittaus suorittaa uudelleen samoin parametrein ajetuilla uusilla komponenteilla, jotta nähtäisiin, pysyvätkö arvot samoina. Lisäksi olisi hyvä testata ajoa myös muilla musteen sekoitussuhteilla, jotta nähtäisiin, korreloiko sekoitussuhteen muuttaminen neliöresistanssin kanssa.

Vastusten tehonkestoa mitattiin syöttämällä kolmeen eri vastuskomponenttiin neljää eri jännitettä ja mittaamalla kytkennässä kulkeva virta, jolloin saatiin laskettua komponentissa syntyvä häviöteho. Todellista komponentin tehonkestoa ei saatu selvitettyä vastuskomponenttien suurien resistanssiarvojen takia, jotka olisivat vaatineet huomattavasti suurempia jännitteitä, jotta tehohäviön arvot olisi saatu nostettua merkittäviin lukemiin. Lisäksi mittauksen aikana olisi pitänyt seurata myös resistanssiarvojen muutoksia, jotta saataisiin selville, milloin komponentin resistanssiarvo ei pysy toleranssien asettamissa rajoissa. Saman mittauksen aikana seurattiin myös komponentin pintalämpötilan muutoksia, joissa

ei odotusten mukaisesti tapahtunut merkittäviä muutoksia pienten virtojen ja tehohäviöiden vuoksi.

Lisäksi oli tarkoitus tutkia olosuhteiden vaikutusta painetun vastuskomponentin ominaisuuksiin tekemällä komponenteille standardin mukainen 1000 tunnin mittainen lämpötila- ja kosteusmittaus, jonka aikana seurattiin komponentin resistanssiarvojen muutoksia. Koska mittalaite oli tuntemattomasta syystä pysähtynyt 732 tunnin kohdalle, ei päästy standardin vaatimiin tuloksiin. Tuloksista on nähtävissä, että mittauksen alussa lämpötilan vaikutuksesta resistanssiarvot nousevat, jonka jälkeen ne kääntyvät hitaaseen laskuun. Resistanssiarvojen lasku on selitettävissä kosteuden aiheuttamalla korroosiolla, joka heikentää ajan kuluessa komponentin ominaisuuksia. Lisäksi tehtiin toinen lämpötilamittaus, jossa muuteltiin lämpötilaa $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$:n ja $75\text{ }^{\circ}\text{C}$:n välillä. Lämpötilatestin tulosten perusteella on todettavissa resistanssiarvojen olevan suurimmillaan kylmimmässä lämpötilassa ja pienimmillään suurimmissa lämpötiloissa.

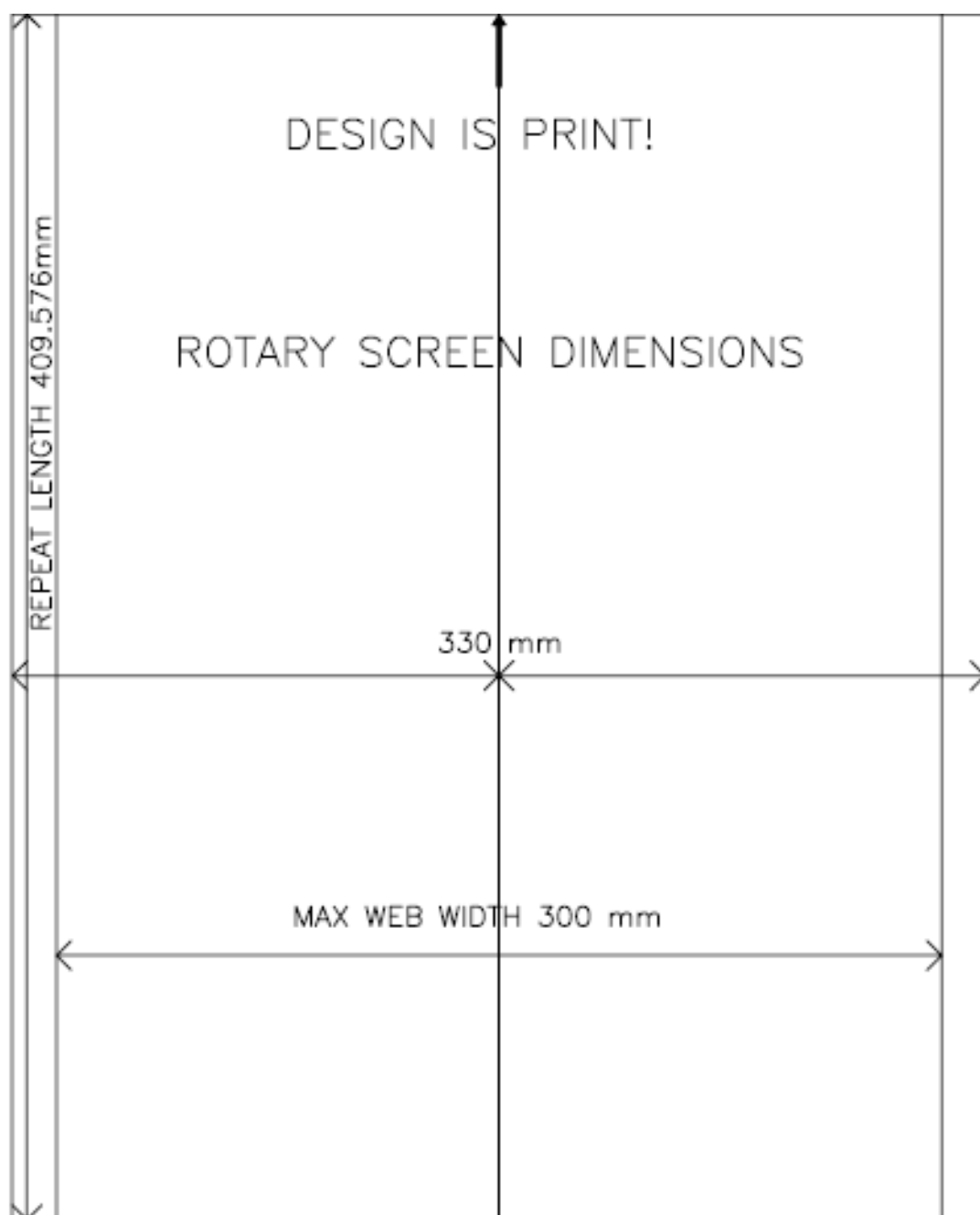
Olosuhteiden vaikutusta komponentin ominaisuuksiin tutkittiin myös taivutustesteillä. Taivutustestin tuloksista on todettavissa, että resistanssi on suurimmillaan, kun vastus oli venytettynä, ja pienimmillään sen ollessa puristuksessa. Ensimmäisen vastuksen venytystestin tuloksista on nähtävissä, että käyrä ei ole tasaisesti muuttuva. Tämä johtuu siitä, että komponentti ei taipunut tasaisesti testin aikana.

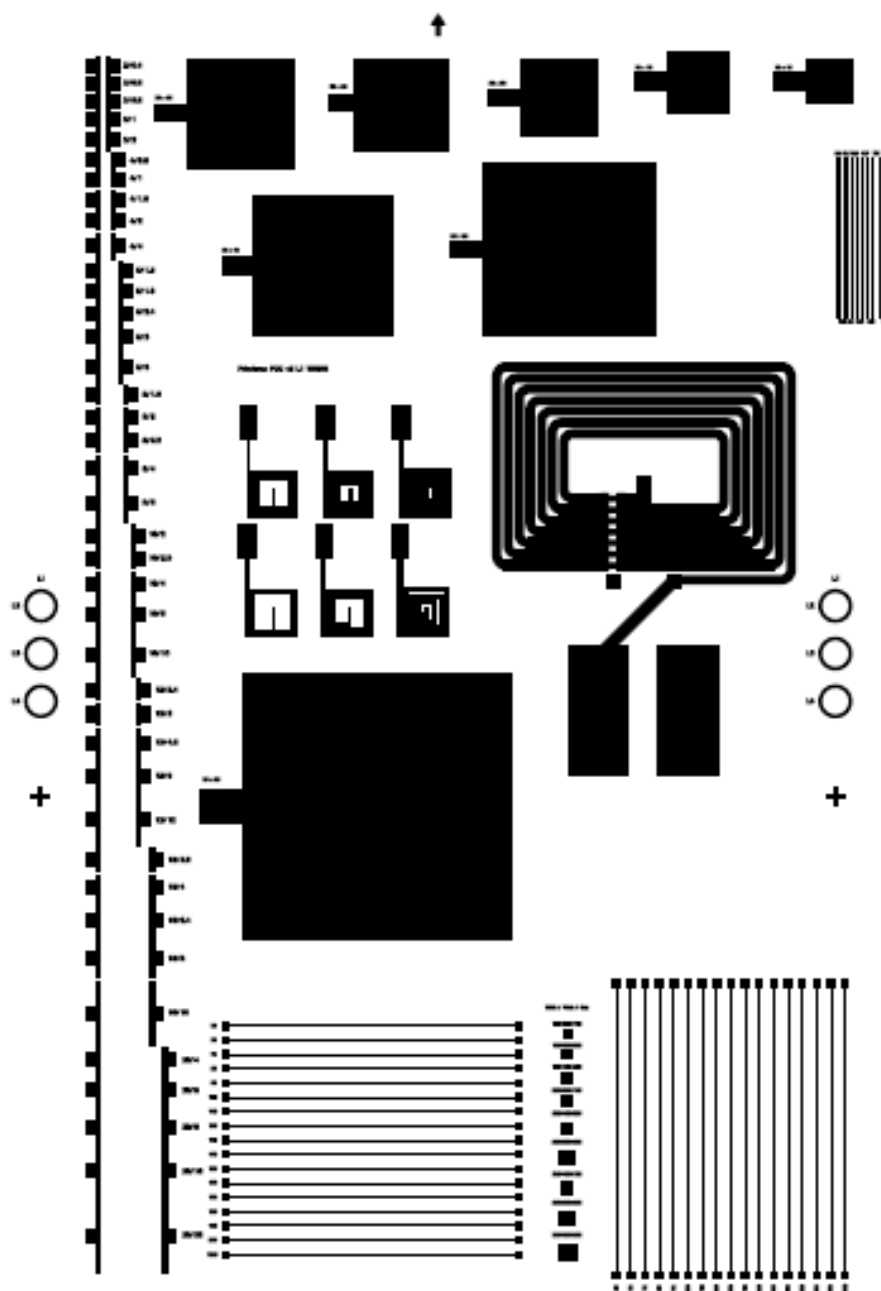
Tämän työn perusteella saatiin tietoa painettujen vastuskomponenttien nykytilasta. Työn perusteella on mahdollista suunnitella, mihin suuntaan itse komponentteja lähdetään kehittämään. On myös mahdollista suunnitella testejä ja mittauksia, joita komponenteille on järkevää ja oleellista suorittaa.

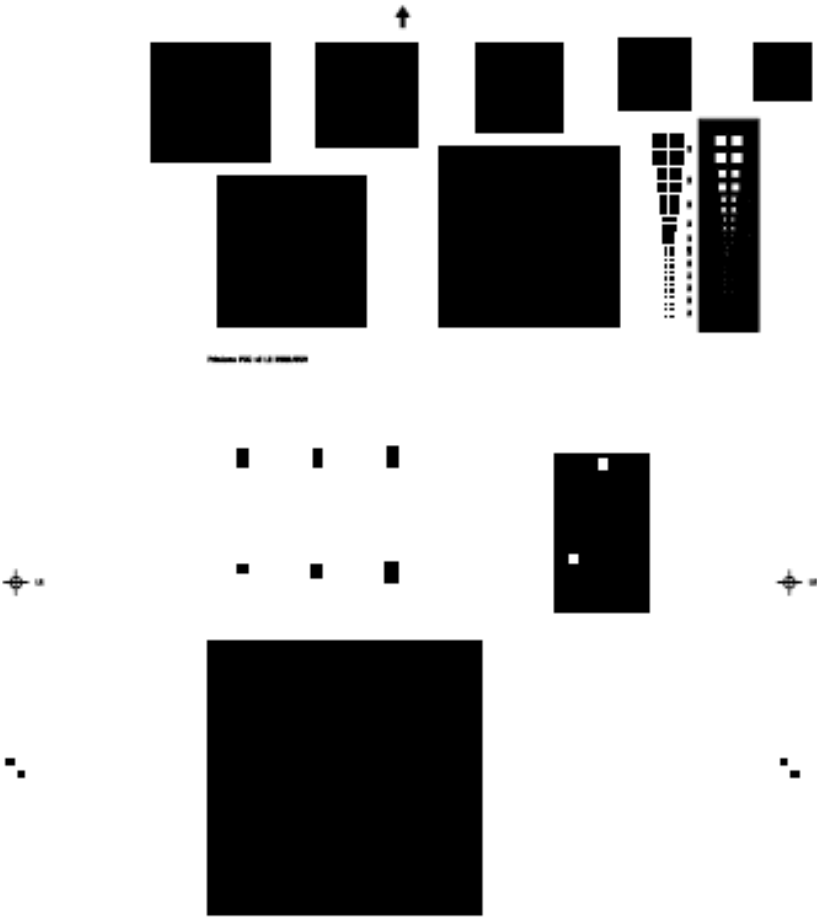
LÄHTEET

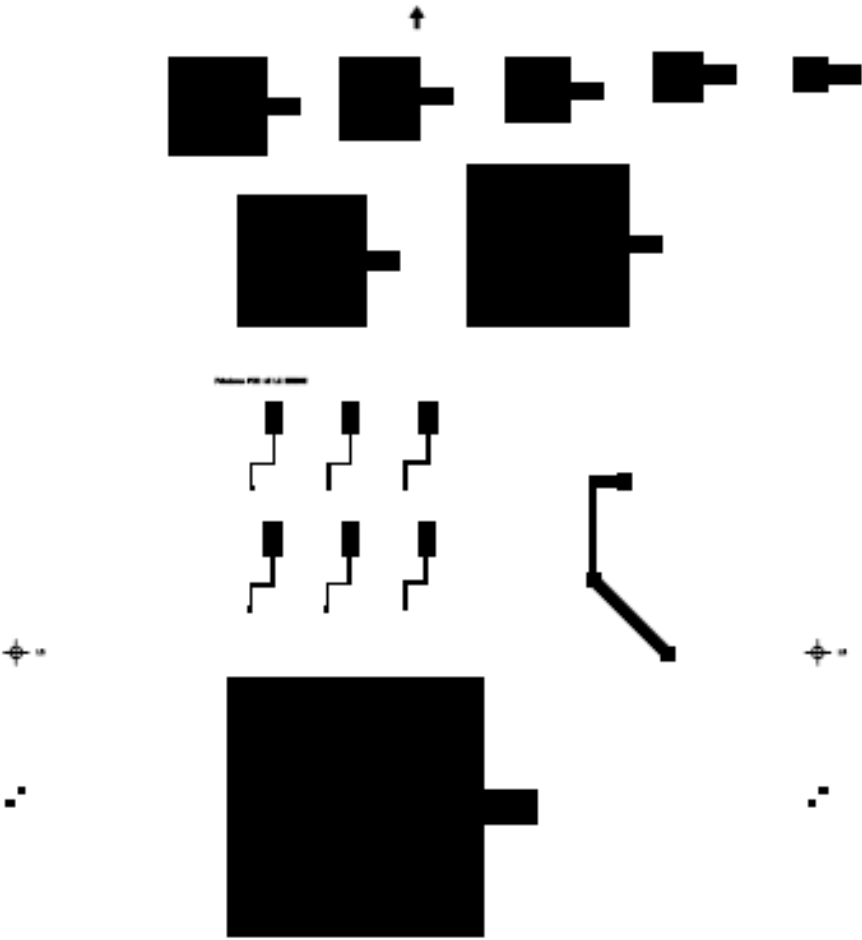
1. Bit Bang Rays to the Future. 2009. Saatavissa: <http://lib.tkk.fi/Reports/2009/isbn9789522480781.pdf>. Hakupäivä 19.6.2012.
2. Viluksela, Pentti – Ristimäki, Seija – Spännäri, Toni 2007. Painoviestinnän tekniikka. Keuruu: Otava.
3. Paakkolanvaara, Mikko 2012. Printed intelligence Pilot factory. Opinnäytetyön esittelytilaisuuden PowerPoint-materiaali keväällä 2012. Oulu: VTT.
4. Hahto, Lasse. 2008. Taipuisan elektroniikan suunnittelu. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Tietoliikenne-elektroniikan koulutusohjelma. Diplomityö.
5. Screen Printing for High-Density Flexible Electronics. 2007. Saatavissa: <http://pcdandf.com/cms/magazine/95/3846>. Hakupäivä 20.6.2012.
6. Material selection for screen printing. 2007. Saatavissa: http://pcdandf.com/cms/images/stories/mag/0710/0710turunen_table1.pdf. Hakupäivä 20.6.2012.
7. Roll-to-Roll Printing in Electronics Applications. 2011. Saatavissa: <http://industrial-printing.net/content/roll-roll-printing-electronics-applications>. Hakupäivä 13.6.2012.
8. Volotinen, Vesa 1997. Analoginen elektroniikka. Komponentit ja peruskytkennot. Porvoo: WSOY.
9. Salo, Pentti 2002. Sähkötekniikan perusoppi. Keuruu: Otava.
10. Passiivikomponentit. Saatavissa: <http://www.ele.tut.fi/teaching/electronics/LV06-07/passiivikomponentit.pdf>. Hakupäivä 25.6.2012.
11. Printed Resistors. Saatavissa: http://www.we-online.com/web/en/intelligente_systeme/produkte_neu/signaluebertragung/gedruckte_widerstaende/gedruckte_Widerstaende.php. Hakupäivä 25.6.2012.

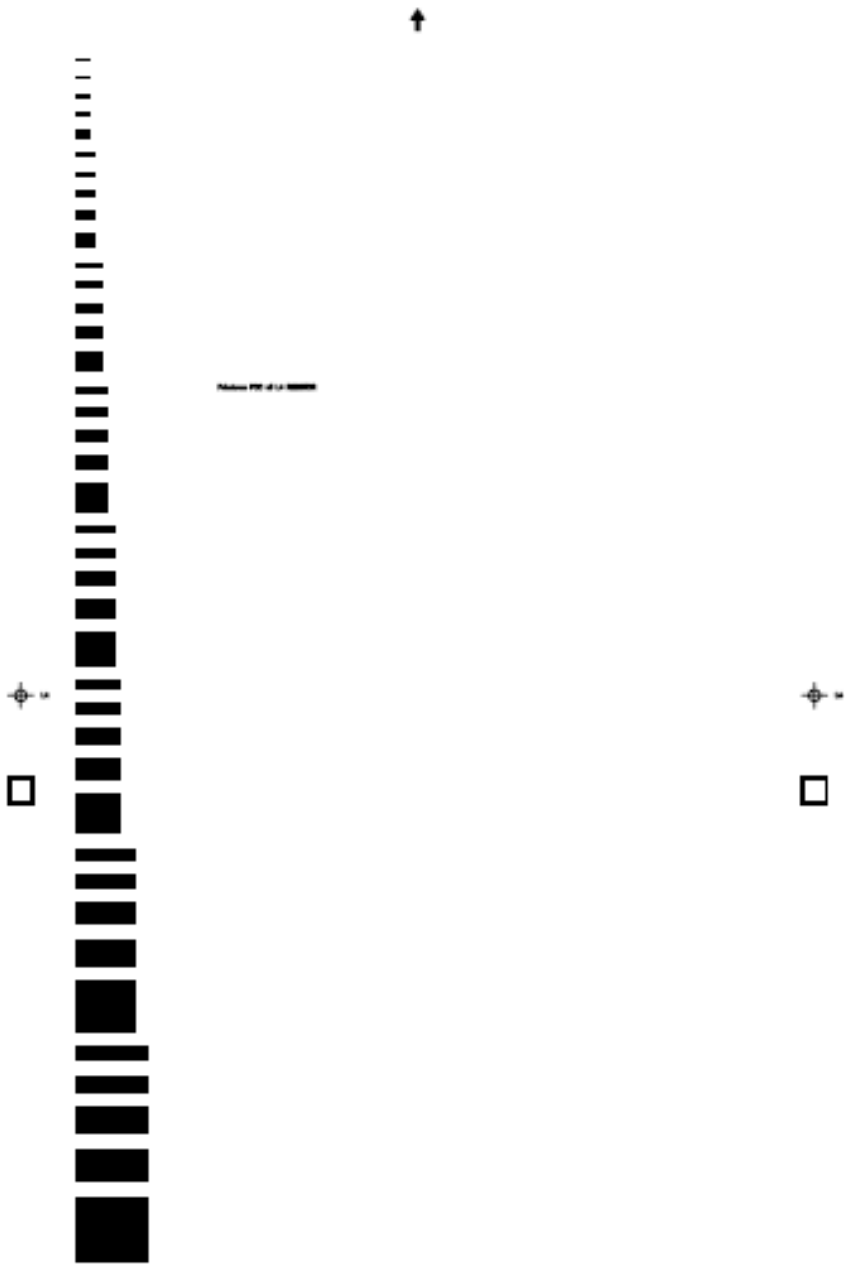
12. Integroidut piirit. Saatavissa: <http://cc.oulu.fi/~trantala/opetus/files/PTP-72115.Puolijohdetekniikan.perusteet/PTP99.ss001-058.pdf>. Hakupäivä 25.6.2012.
13. Niiranen, Sini. 2011. Plasmakäsitellyn nestekidepolymeerin ja silikonin välisen adheesion heikkeneminen kiihdytetyissä ympäristörasitustesteissä. Espoo: Aalto yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu, Elektroniikan integroinnin ja luotettavuuden koulutusohjelma, Diplomityö.
14. Hienonen, Risto – Lahtinen, Reima. 2007. Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa. Helsinki: VTT, Julkaisu.
15. Fluke 170 Series True-rms Digital Multimeters Detailed Specifications. Saatavissa:
http://www.kimrok.fi/sivut/images/testikuvia/Fluke_170_sarja_datat.pdf. Hakupäivä 9.7.2012.











PAINETUT VASTUKSET

Käytetyt materiaalit ja tekniikat

Painotekniikka	Rullasilkipaino
Substraatti	Melinex ST506 125µm/300mm
Painoväri	Sunchemical CRSN2442 (hopeamuste)
	Henkel PM-404 (80m%) ja 6017SS (20 m%) (vastusmusteet)
	Sunchemical Hidastin 503-99033

Painettujen vastusten kerrospaksuus

Kerrospaksuus/nm	Keskiarvo/nm
3453,06	3344,74
3267,8	
3313,36	

Kalanteroimattomien vastuksien dimensiot, neliömäärä, minimi-, maksimi-resistanssit ja resistanssien keskiarvot sekä toleranssit

Resistanssiarvot/MΩ	Pituus/mm	Leveys/mm	Neliömäärä	Min.	Max.	Avg.	Min%	Max%
1 (pienin vastus)	4	0,4	5	1,128	1,980	1,605	30	23
2	4	0,5	4	0,911	1,664	1,269	28	31
3	4	0,8	2,5	0,547	0,967	0,764	28	27
4	4	1	2	0,416	0,731	0,587	29	25
5	4	2	1	0,217	0,353	0,285	24	24
6	6	0,8	5	1,232	2,171	1,655	26	31
7	6	1	4	0,904	1,619	1,225	26	32
8	6	1,6	2,5	0,572	0,922	0,747	23	23
9	6	2	2	0,452	0,779	0,599	25	30
10	6	4	1	0,220	0,343	0,280	22	22
11	8	1,2	5	1,304	2,289	1,736	25	32
12	8	1,5	4	0,862	1,539	1,229	30	25
13	8	2,4	2,5	0,627	0,999	0,796	21	26
14	8	3	2	0,468	0,841	0,663	29	27
15	8	6	1	0,227	0,411	0,323	30	27
16	10	1,6	5	1,266	2,145	1,712	26	25
17	10	2	4	0,937	1,744	1,241	24	41
18	10	3,2	2,5	0,587	1,087	0,815	28	33
19	10	4	2	0,469	0,912	0,668	30	37
20	10	8	1	0,218	0,404	0,310	30	30
21	12	2	5	1,000	2,425	1,675	40	45
22	12	2,5	4	0,759	1,625	1,187	36	37
23	12	4	2,5	0,472	1,029	0,782	40	32
24	12	5	2	0,383	0,768	0,564	32	36
25	12	10	1	0,201	0,383	0,284	29	35
26	14	2,4	5	0,763	2,085	1,434	47	45
27	14	3	4	0,672	1,731	1,149	41	51
28	14	4,8	2,5	0,473	1,008	0,694	32	45
29	14	6	2	0,412	0,786	0,549	25	43
30	14	12	1	0,200	0,370	0,272	26	36
31	18	3,2	5	0,900	1,920	1,394	35	38
32	18	4	4	0,783	1,488	1,115	30	33
33	18	6,4	2,5	0,505	0,911	0,694	27	31
34	18	8	2	0,387	0,749	0,559	31	34
35	18	16	1	0,192	0,361	0,267	28	35
36	22	4	5	0,882	2,119	1,354	35	56
37	22	5	4	0,694	1,466	1,041	33	41
38	22	8	2,5	0,448	0,870	0,643	30	35
39	22	10	2	0,311	0,666	0,489	36	36
40 (suurin vastus)	22	20	1	0,159	0,316	0,234	32	35

Kalanteroitujen vastuksien dimensiot, neliömäärä, minimi-, maksimiresistanssit ja resistanssien keskiarvot sekä toleranssit

Resistanssiarvot/MΩ	Pituus/mm	Leveys/mm	Neliömäärä	Min.	Max.	Avg.	Min%	Max%
1 (Pienin vastus)	4	0,4	5	1,137	1,827	1,483	23	23
2	4	0,5	4	0,906	1,653	1,207	25	37
3	4	0,8	2,5	0,548	0,964	0,729	25	32
4	4	1	2	0,421	0,699	0,567	26	23
5	4	2	1	0,197	0,350	0,275	28	27
6	6	0,8	5	1,125	2,110	1,572	28	34
7	6	1	4	0,885	1,626	1,171	24	39
8	6	1,6	2,5	0,561	0,895	0,714	21	25
9	6	2	2	0,444	0,730	0,577	23	26
10	6	4	1	0,221	0,341	0,275	20	24
11	8	1,2	5	1,292	2,122	1,653	22	28
12	8	1,5	4	0,856	1,550	1,182	28	31
13	8	2,4	2,5	0,606	0,976	0,772	21	26
14	8	3	2	0,468	0,823	0,649	28	27
15	8	6	1	0,232	0,400	0,317	27	26
16	10	1,6	5	1,220	2,144	1,643	26	30
17	10	2	4	0,929	1,764	1,215	24	45
18	10	3,2	2,5	0,581	1,105	0,798	27	38
19	10	4	2	0,454	0,880	0,654	31	35
20	10	8	1	0,221	0,415	0,306	28	36
21	12	2	5	1,003	2,244	1,626	38	38
22	12	2,5	4	0,762	1,632	1,158	34	41
23	12	4	2,5	0,479	1,020	0,768	38	33
24	12	5	2	0,393	0,754	0,555	29	36
25	12	10	1	0,202	0,372	0,282	28	32
26	14	2,4	5	0,789	2,229	1,453	46	53
27	14	3	4	0,689	1,672	1,141	40	47
28	14	4,8	2,5	0,483	0,991	0,698	31	42
29	14	6	2	0,418	0,770	0,551	24	40
30	14	12	1	0,202	0,365	0,273	26	34
31	18	3,2	5	0,912	1,870	1,389	34	35
32	18	4	4	0,806	1,458	1,126	28	30
33	18	6,4	2,5	0,521	0,901	0,696	25	29
34	18	8	2	0,391	0,742	0,561	30	32
35	18	16	1	0,195	0,357	0,268	27	33
36	22	4	5	0,893	2,074	1,331	33	56
37	22	5	4	0,699	1,455	1,027	32	42
38	22	8	2,5	0,455	0,854	0,637	29	34
39	22	10	2	0,316	0,655	0,487	35	34
40 (Suurin vastus)	22	20	1	0,166	0,319	0,235	29	36

Kalanteroimattomien vastuksien keskiarvot suhteutettuna neliömäärään sekä niiden minimi-, maksimi- ja keskiarvot, sekä toleranssit

Suhteessa neliömäärään MΩ/neliö								
5 neliötä	0,321	0,331	0,347	0,342	0,335	0,287	0,279	0,271
4 neliötä	0,317	0,306	0,307	0,310	0,297	0,287	0,279	0,260
2,5 neliötä	0,306	0,299	0,318	0,326	0,313	0,278	0,278	0,257
2 neliötä	0,294	0,299	0,332	0,334	0,282	0,274	0,279	0,244
1 neliö	0,285	0,280	0,323	0,310	0,284	0,272	0,267	0,234
Average	0,304	0,303	0,325	0,324	0,302	0,280	0,276	0,253
Min	0,285	0,280	0,307	0,310	0,282	0,272	0,267	0,234
Max	0,321	0,331	0,347	0,342	0,335	0,287	0,279	0,271
Min%	6,44	7,51	5,60	4,53	6,68	2,82	3,37	7,50
Max%	5,43	9,17	6,72	5,52	10,90	2,71	1,12	6,86
Tolerance +/-	6,44	9,17	6,72	5,52	10,90	2,82	3,37	7,50

Kalanteroitujen vastuksien keskiarvot suhteutettuna neliömäärään sekä niiden minimi-, maksimi- ja keskiarvot, sekä toleranssit

Suhteessa neliömäärään MΩ/neliö								
5 neliötä	0,297	0,314	0,331	0,329	0,325	0,291	0,278	0,266
4 neliötä	0,302	0,293	0,296	0,304	0,289	0,285	0,281	0,257
2,5 neliötä	0,291	0,286	0,309	0,319	0,307	0,279	0,279	0,255
2 neliötä	0,284	0,289	0,324	0,327	0,277	0,276	0,280	0,244
1 neliö	0,275	0,275	0,317	0,306	0,282	0,273	0,268	0,235
Average	0,290	0,291	0,315	0,317	0,296	0,281	0,277	0,251
Min	0,275	0,275	0,296	0,304	0,277	0,273	0,268	0,235
Max	0,302	0,314	0,331	0,329	0,325	0,291	0,281	0,266
Min%	5,09	5,62	6,24	4,20	6,33	2,69	3,47	6,35
Max%	4,18	7,93	4,92	3,68	9,76	3,53	1,54	5,87
Tolerance +/-	5,09	7,93	6,24	4,20	9,76	3,53	3,47	6,35

296 kΩ:n suuruisen vastuksen tehohäviö 5, 12, 24 ja 30 V:n jännitteillä

Jännite/V	Virta/mA	Tehohäviö/mW
5	0,016	0,08
12	0,0385	0,462
24	0,0775	1,86
30	0,0974	2,922

296 kΩ:n suuruisen vastuksen pintalämpötila 5 V:n jännitteellä

Ajanhetki/min	Lämpötila/°C	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25	24,7	45,5
1	25	24,7	45,7
5	25	24,8	46,5
10	25	24,8	46,6
15	25	24,9	45,8
30	25,3	25	45,8
45	25,2	25,3	44,9
60	25,4	25,3	44,6

296 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötila 12 V:n jännitteellä

Ajanhetki/min	Lämpötila/°C	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,4	25,3	44,6
1	25,4	25,3	44,5
5	25,5	25,3	44,5
10	25,4	25,3	44,5
15	25,5	25,3	44,6
30	25,4	25,4	44,1
45	25,5	25,3	44,5
60	25,4	25,4	43,9

296 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötila 24 V:n jännitteellä

Ajanhetki/min	Lämpötila/°C	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,6	25,4	43,9
1	25,6	25,4	43,9
5	25,6	25,4	44,1
10	25,5	25,3	44
15	25,5	25,4	43,8
30	25,6	25,5	43,6
45	25,5	25,5	43,5
60	25,7	25,5	43,3

296 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötila 30 V:n jännitteellä

Ajanhetki/min	Lämpötila/°C	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,9	25,5	43,3
1	25,8	25,5	43,5
5	25,7	25,5	43,3
10	25,7	25,5	43,3
15	25,7	25,5	43,3
30	25,7	25,4	43,1
45	25,8	25,4	43,1
60	25,7	25,4	43,2

272 k Ω :n suuruisen vastuksen tehohäviö 5, 12, 24 ja 30 V:n jännitteillä

Jännite/V	Virta/mA	Tehohäviö/mW
5	0,0196	0,098
12	0,047	0,564
24	0,0954	2,2896
30	0,12	3,6

272 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötila 5 V:n jännitteellä

Ajanhetki/min	Lämpötila/°C	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,8	24,7	36,7
1	25,4	24,7	37
5	25,5	24,6	36,5
10	26,1	24,7	36,6
15	25,2	24,7	36,7
30	25,2	24,8	36,2
45	25,6	24,9	36,6
60	25,2	24,9	36

272 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötila 12 V:n jännitteellä

Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,4	25	36,1
1	25,3	24,9	35,9
5	25,4	24,9	36
10	25,4	24,9	35,7
15	25,4	24,9	35,8
30	25,4	25	35,4
45	25,4	25,1	35,1
60	25,4	25,1	34,2

272 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötila 24 V:n jännitteellä

Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,7	25,1	34,5
1	25,7	25,1	34,2
5	25,8	25,1	34,5
10	25,9	25,2	34,4
15	25,9	25,1	34,1
30	25,9	25,1	33,9
45	26	25,2	33,5
60	26	25,2	33,2

272 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötila 30 V:n jännitteellä

Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	26,3	25,2	33
1	26,3	25,2	32,8
5	26,3	25,2	32,9
10	26,4	25,3	32,5
15	26,4	25,2	32,4
30	26,5	25,2	32,6
45	26,5	25,4	32,6
60	26,4	25,3	32,5

670 k Ω :n suuruisen vastuksen tehohäviö 5, 12, 24 ja 30 V:n jännitteillä

Jännite/V	Virta/mA	Tehohäviö/mW
5	0,0089	0,0445
12	0,0198	0,2376
24	0,0397	0,9528
30	0,05	1,5

670 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötila 5 V:n jännitteellä

Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,4	24,4	32,9
1	24	23,9	32,6
5	23,8	23,6	33
10	24,2	23,7	32,9
15	23,6	23,8	32,8
30	23,6	24	32,6
45	23,8	24,1	32
60	24	24,1	31,6

670 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötila 12 V:n jännitteellä

Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	23,7	24,1	31,5
1	23,9	24,1	32,1
5	23,8	24,1	31,2
10	23,7	24,2	31,1
15	24,1	24,2	31
30	24,1	24,3	30,7
45	24,3	24,3	30,1
60	23,9	24,4	30,2

670 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötila 24 V:n jännitteellä

Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	24,2	24,4	30,01
1	24,3	24,4	30,3
5	24,7	24,4	30,3
10	25	24,4	30,5
15	24,6	24,4	30,8
30	24,7	24,3	30,9
45	24,7	24,4	30,3
60	24,8	24,5	30

670 k Ω :n suuruisen vastuksen pintalämpötila 30 V:n jännitteellä

Ajanhetki/min	Lämpötila/C°	Ilman lämpötila/°C	Ilman kosteus/%
0	25,1	24,5	30,1
1	25	24,5	30,2
5	24,9	24,5	30
10	25	24,6	30
15	25	24,6	30,1
30	25,1	24,7	30,2
45	25	24,6	30,2
60	25	24,7	30,3

**Kahden vastuksen resistanssiarvojen muutos 85 °C/85 RH -
olosuhdetestissä**

	Vastus 1	Vastus 2
Ajanhetki/h	Resistanssi/MΩ	
0	0,255	1,375
10	0,267	1,401
25	0,282	1,429
50	0,269	1,359
100	0,255	1,278
195	0,237	1,199
335	0,221	1,117
407	0,214	1,083
503	0,206	1,041
579	0,201	1,006
700	0,193	0,973
732	0,184	0,78

Vastuksen resistanssiarvon muutos lämpösyklitestissä

Lämpötila/°C	Resistanssi/MΩ
25	1,116
50	1,095
75	1,091
50	1,116
25	1,126
0	1,152
-25	1,18
0	1,142
25	1,124
50	1,104
75	1,08
50	1,103
25	1,12
0	1,145
-25	1,172
0	1,135
25	1,116